

Wirksamkeit von Augmented Reality zur Förderung des Stoff- Teilchen-Konzeptverständnisses

Melanie Ida Erika Ripsam

Vollständiger Abdruck der von der TUM School of Social Sciences and Technology der
Technischen Universität München zur Erlangung einer

Doktorin der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitz: Prof. Dr. Manuel Förster

Prüfer*innen der Dissertation:

1. Prof. Dr. Claudia Nerdel
2. Prof. Dr. Sebastian Habig
3. Prof. Dr. Cornelia Gräsel

Die Dissertation wurde am 07.07.2023 bei der Technischen Universität München eingereicht
und durch die TUM School of Social Sciences and Technology am 02.11.2023 angenommen.

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird im Text verallgemeinernd das generische Maskulinum verwendet. Diese Formulierungen umfassen gleichermaßen weibliche und männliche Personen. Alle sind damit gleichberechtigt angesprochen.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Chemie lässt sich in eine makroskopische, submikroskopische und repräsentative Ebene teilen. Die makroskopische Ebene (Stoffebene) beschreibt reale, beobachtbare Phänomene der stofflichen Welt. Die submikroskopische Ebene (Teilchenebene) fokussiert Teilchen wie Atome, Ionen oder Moleküle und chemische Prozesse als Teilchenbewegungen, die den Aufbau der Materie modellieren können. Die repräsentative Ebene umfasst deskriptionale und depiktionale Repräsentationen in Form von Texten, Bildern und Symbolen, welche unter anderem zu multiplen externen Repräsentationsformen (MER) verknüpft werden können. Demzufolge nimmt die chemische Fachsprache, d.h. der Umgang mit (M)ER, eine besondere Stellung beim Lernen im Fach Chemie ein. Zur adäquaten Erklärung chemischer Phänomene, für Problemlösungen oder Vorhersagen über chemische Prozesse bedarf es einer ausgeprägten Representational Competence, die sich auf die Schwerpunkte *Konstruktion*, *Interpretation* und *Translation* von (M)ER stützt. Entsprechend wird dem multimedialen Lernen und seinen kognitiven Verarbeitungsprozessen bei der Verwendung von MER eine essenzielle Rolle zugesprochen. Die chemische Fachsprache ist ein Konstruktionsmittel, wobei der Lernende die Signalbedeutungen und semantischen Vernetzungen selbst entwickelt. Aus kognitionspsychologischer Perspektive kann die Informationsverarbeitung höchst komplex sein. Internationale Studien bestätigen, dass Novizen oftmals Schwierigkeiten haben, z.B. Symbole als Veranschaulichung von realen Phänomenen zu begreifen. Ferner wird der Teilchenbegriff inkonsistent genutzt oder fälschlicherweise mit der makroskopischen Ebene vermischt. Der Lehrkraft kommt daher eine Vorbildfunktion zu, bei der inhaltlichen Vermittlung des Stoff-Teilchen-Konzepts chemische Fachsprache und Repräsentationen korrekt anzuwenden. Jedoch decken Forschungen immer wieder auf, dass (angehende) Lehrpersonen bei Erläuterungen zu Stoff-Teilchen-Ebenenwechseln oftmals mangelnde Sprachfertigkeiten aufweisen und unzureichend zwischen den Ebenen differenzieren. Häufig wird der präzise Einsatz von Fachbegriffen bei Prozessen auf Stoff- und Teilchenebene als redundant angesehen. Insgesamt scheint das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis sowohl schwer lern- als auch lehrbar zu sein. Folglich ist es eine offene Frage, wie Lernprozesse, auch in Hinblick auf die spätere Vermittlung im Fachunterricht, bei Chemielehramtsstudierenden und -lehrkräften wirksam instruktional unterstützt werden können, um die Schwierigkeiten hinsichtlich des Umgangs mit den drei Ebenen und ihren Modellierungsprozessen vermeiden zu können. Durch die zunehmende Digitalisierung von Schule und Unterricht bietet es sich an, digitale Medien als Fördermaßnahme in die fachspezifische Lehrerbildung und -fortbildung zu integrieren. Digitale Medien können einerseits bei Verwendung selbstgesteuerter Lernumgebungen lernwirksam sein und andererseits nützen, wenn Prozesse, die mit bloßem Auge nicht sichtbar sind, gemeinsam mit dem realen Phänomen sichtbar gemacht werden. Schüler müssen, neben den fachlichen und prozessbezogenen Fähigkeiten und Fertigkeiten, auch Kompetenzen zum Umgang mit digitalen

Medien erwerben. Angesichts dessen erweitert sich das Professionswissen der Lehrkräfte um die technische Komponente. Eine Vielzahl an digitalen Lehr- und Lernwerkzeugen steht den Lehrpersonen zur Verfügung. Bei Augmented Reality (AR) befindet man sich in einer realen Umgebung, die zugleich Realität erweiternde Elemente enthält und eine Interaktion mit diesen AR-Objekten ermöglicht. Durch die räumliche und zeitliche Verknüpfung von realen und virtuellen Objekten kann Kontiguität sichergestellt und ein Split-Attention-Effekt vermieden werden, was sich wiederum positiv auf die kognitive Verarbeitung der unterschiedlichen Repräsentationen auswirken kann. Werden statt Tablets oder Smartphones AR-Brillen als HMD¹-Technologie zur Projektion eines AR-Szenarios verwendet, erzeugen diese sogar ein immersives Erleben. Technische Innovationen wie AR können aber nur dann perspektivisch Anwendung im Fachunterricht finden, wenn sie von den Lehrpersonen als Lehr- und Lernwerkzeug angenommen werden. Dabei sind es die Einstellungen und Selbstwirksamkeitserwartungen hinsichtlich digitaler Medien bzw. AR (Personenmerkmale) und die Merkmale der Lernumgebung (Usability), welche als Einflussgrößen auf die Akzeptanz wirken können. Im Rahmen dieser Dissertationsarbeit wurden zwei empirische Studien durchgeführt.

Hauptstudie 1 untersucht die Akzeptanz von technischen Innovationen wie AR bei Lehrpersonen. Dabei wird der Frage nachgegangen, wie die Merkmale des Individuums und der Lernumgebung mit der Akzeptanz zusammenhängen. Für das Forschungsprojekt wurde eine AR-Lernumgebung als Tablet-Variante zum Thema Redoxreaktionen am Beispiel Elektrolyse von Zinkiodid konzipiert, die auf einen Realversuch Teilchenprozesse in Form von AR-Repräsentationen projiziert. Ferner wurden zwei weitere inhaltsgleiche Lernszenarien als non-AR- und HMD-AR-Variante zur Anwendung auf dem Tablet und der AR-Brille konzipiert. 157 MINT-Lehrkräfte, größtenteils mit dem Unterrichtsfach Chemie, nahmen an der digitalen Vorbefragung zur Erfassung der Personenmerkmale teil. Anschließend bearbeiteten die Probanden, aufgeteilt in drei Gruppen, non-AR (N = 35), AR (N = 46) und HMD-AR (N = 41), die Lernumgebung und füllten (N = 122) anschließend den digitalen Fragebogen zur Akzeptanz und Usability aus. Die Daten wurden gemäß den quantitativen statistischen Methoden der empirischen Sozialforschung ausgewertet. Die Ergebnisse suggerieren, dass MINT-Lehrkräfte Möglichkeiten und Nutzen im Einsatz digitaler Medien und AR für den naturwissenschaftlichen Unterricht sehen. Wohingegen die eigenen Fähigkeiten im Umgang mit digitalen Medien positiv eingestuft wurden, fielen die Beurteilungen der individuellen Selbstwirksamkeitserwartungen bezogen auf AR sehr niedrig aus. Das Konzept der AR-Lernumgebung wurde positiv eingeschätzt. Die Ergebnisse deuten auf eine hohe Annahme technischer Innovationen wie AR hin, wobei insbesondere die mediale und instruktionale Gestaltung eine hohe Akzeptanz erfuhr. Es wird angemerkt, dass die Ergebnisse zur Akzeptanz und Usability auf eine erhöhte Annahme der

¹ Head-Mounted Display (AR-Brille)

AR-Lernumgebung auf dem Tablet hinweisen. Im Vergleich dazu wurde die HMD-AR-Lernumgebung auf der AR-Brille heterogener eingestuft und schien von den Lehrkräften am wenigsten akzeptiert worden zu sein. Angesichts dessen zeigt sich eine erste Tendenz, dass vor allem die unterschiedlichen technischen Funktionen der drei Lernsettings (non-AR Tablet vs. AR Tablet vs. HMD-AR Brille) zu Gruppenunterschieden führten. Auf Basis der Zusammenhangsanalysen wurde ermittelt, dass die Einstellungen zu AR einen signifikanten Einfluss auf die Usability und die Akzeptanz hatten und zudem die Usability-Merkmale *Problemorientierte Didaktik*, *Voraussichtlicher Lernerfolg* und *Individualisierung* signifikant auf die Akzeptanz wirkten. Folglich konnte die Usability als Mediator identifiziert werden. Überdies ließ sich feststellen, dass positive Einschätzungen hinsichtlich des Potentials von AR die Bewertung der Lernumgebung positiv beeinflussten und die Akzeptanz erhöhten. Insbesondere die didaktische Gestaltung der Lernumgebung schien die Annahme dieser zu erhöhen. Demnach hatte die Usability der AR-Lernumgebung einen deutlich größeren Einfluss auf die Akzeptanz von technischen Innovationen als die Personenmerkmale.

Mit Hauptstudie 2 sollte die Wirksamkeit von AR-Lernumgebungen zur Förderung des Stoff-Teilchen-Konzeptverständnisses bei Chemielehrkräften untersucht werden. In einem einfaktoriellen Design nahmen Chemielehrkräfte (N = 40) an einem Prä- und Posttest teil. Zwischen den beiden Messzeitpunkten arbeitete die Experimentalgruppe (N = 20) mit der AR-Lernumgebung und die Kontrollgruppe (N = 20) mit dem inhaltsgleichen simulationsbasierten Setting (non-AR). Testaufgaben, die mit lautem Denken zu beiden Messzeitpunkten elaboriert wurden, operationalisieren das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis. Für die Auswertung der Protokolle des Lauten Denkens wurden zwei Kategoriensysteme, zum Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis und zur chemischen Fachsprache, deduktiv entwickelt und anschließend induktiv am Datenmaterial angepasst. Die quantitative Häufigkeits- und qualitative Inhaltsanalyse der Kategorisierungen deckte auf, dass die konzeptionelle Aufbereitung beider Lernumgebungen die Probanden angeregt hatte, sich tiefer mit Stoff- und Teilchenebene auseinanderzusetzen. Es wurde der Trend ersichtlich, dass vor allem die Arbeit mit der AR-Lernumgebung eine intensivere Elaboration auf Stoffebene nach sich zog und die Lehrkräfte der AR-Gruppe von Messzeitpunkt 1 auf 2 mehr verstehensorientiert und weniger suchorientiert elaborierten. Im Prätest wurden in beiden Gruppen Schwierigkeiten hinsichtlich des Umgangs mit Stoff- und Teilchenebene diagnostiziert, die sich häufig auf mangelnde Sprachfertigkeiten (Vernachlässigung von Fachbegriffen oder Vermischung von (M)ER) stützten. Zudem stellte der Ebenenwechsel eine große Herausforderung dar. Nach dem Treatment stellten alle Probanden mehr Beziehungen zwischen den Ebenen her und wechselten dezidierter zwischen ihnen. Zudem rückte von Prä- auf Posttest der bloße Text in den Hintergrund, sodass tendenziell eher Symbole und MER gewichtet wurden. Dabei nutzten die Probanden im Posttest (M)ER systematischer für ihre

Erklärungen zu Stoff- und Teilchenebene, was erfolgreiche Ebenenwechsel begünstige. Insgesamt weisen die Ergebnisse darauf hin, dass das AR-Setting eine größere Wirkung auf die kognitiven Verarbeitungsprozesse bei der Nutzung von Stoff- und Teilchenebene hatte. Die AR-Gruppe grenzte sich dahingehend von der Simulations-Gruppe ab, dass sie nach dem Treatment sichtlich gewissenhafter mit der repräsentativen Ebene umging und erfolgreicher zwischen Stoff- und Teilchenebene differenzierte.

An diese Ergebnisse anknüpfend, wurde im Rahmen von Hauptstudie 2 in einer zweiten, qualitativen Teilstudie, die Wirkung der Interaktivität bei der Nutzung von (immersiven) AR-Repräsentationen auf das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis untersucht. Analog zu dem beschriebenen Vorgehen nahmen Chemielehrkräfte (N = 40) an einer Prä-Post-Testbearbeitung per Lautem Denken teil und elaborierten zwischen den beiden Messzeitpunkten, aufgeteilt in zwei Gruppen, eine der beiden Lernumgebungen. Die Experimentalgruppe (N = 20) arbeitete mit der HMD-AR-Lernumgebung auf der AR-Brille und die Kontrollgruppe (N = 20) mit der inhaltsgleichen AR-Lernumgebung auf dem Tablet. Die Auswertung und qualitative Inhaltsanalyse sowie quantitative Häufigkeitsanalyse der Kategorisierungen stützte sich auf denselben Erhebungs- und Auswertungsmethoden, wie bereits oben beschrieben. Die Ergebnisse zeigen auf, dass die Arbeit mit dem „klassischen“ AR-Setting auf dem Tablet größere Verhaltensveränderungen in Hinblick auf das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis als auf der AR-Brille nach sich zog. Dabei erzielten die Probanden, die mit AR im Tablet-Format arbeiteten, positivere Effekte hinsichtlich ihres Stoff-Teilchen-Konzeptverständnisses als mit der HMD-AR-Technik. Erneut grenzte sich die AR-Gruppe von der HMD-AR-Gruppe durch den gewissenhafteren Umgang mit der Stoffebene und dem damit einhergehenden adäquateren Ebenenwechsel voneinander ab. Die Testbearbeitungen der HMD-AR-Gruppe lieferten ein heterogeneres Bild. Auch wenn manche Lehrkräfte nach Bearbeitung der HMD-AR-Lernumgebung ein verbessertes Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis aufwiesen, konzentrierte sich ihre Elaboration in der Grundgesamtheit weniger auf dem Ebenenwechsel, sondern mehr auf eine Ebene. Ferner wurde insgesamt nach dem Treatment ersichtlich, dass der adäquate Umgang mit (M)ER in Hinblick auf die gezielte Einbindung von Fachbegriffen (z.B. „Anionen“) und die Explikation von Stoff- und Teilchenebene im Fokus waren. Analog zur AR-Gruppe rückte von Messzeitpunkt 1 auf 2 die Repräsentationsform *Text* in den Hintergrund, wohingegen Symbole sowie MER an Bedeutung gewonnen haben. Ein besonderes Resultat war, dass die AR-Gruppe mehr in allen drei Ebenen zu denken versuchte, wohingegen sich die HMD-AR-Gruppe tendenziell stärker auf die repräsentative Ebene konzentrierte. Demnach liefern die Analysen erste Hinweise dafür, dass die HMD-AR-Lernumgebung auf der AR-Brille eher die chemische Fachsprache und weniger das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis positiv anregt.

ABSTRACT

Chemistry can be divided into macroscopic, submicroscopic, and representative levels. The macroscopic level (substance level) describes real, observable phenomena of the material world. The submicroscopic level (particle level) focuses on particles such as atoms, ions, or molecules and, chemical processes as particle movements that can model matter's structure. The representational level includes descriptive and depictive representations in the form of texts, images, and symbols, which can also be linked to form multiple external representations (MER). Consequently, chemical terminology, i.e., dealing with these (M)ERs, occupies a particular position in learning chemistry. For an adequate explanation of chemical phenomena, a specific Representational Competence is required for problem-solving or predictions about chemical processes, which is based on the main focus on construction, interpretation, and translation of (M)ER. Accordingly, multimedia learning and its cognitive processing operations are considered to play an essential role in using MER. Chemical terminology is a construction tool. However, in this process, the learner develops the signal meanings and semantic networks. From a cognitive psychology perspective, information processing can be highly complex. International studies confirm that novices often have difficulties understanding e.g., symbols as illustrations of real phenomena. Furthermore, the particle concept is used inconsistently or mistakenly mixed with the macroscopic level. Therefore, the teacher has a role model function to correctly use chemical terminology and representations when teaching the substance-particle concept. However, research repeatedly reveals that (prospective) teachers often lack language skills when explaining substance-particle level changes. They also need to differentiate more clearly between levels. Usually, the accurate use of subject terms in substance-particle level processes is seen as redundant. Overall, understanding the substance-particle concept seems to be challenging to learn and teach. Thus, it is an open question how learning processes, also regarding later teaching in the classroom, can be effectively instructed for chemistry students and teachers to avoid difficulties in dealing with the three levels and their modeling processes. Due to the increasing digitalization of schools and teaching, it makes sense to integrate digital media as a promotional measure in science teaching into subject-specific teacher training and continuing education. On the one hand, digital media can be effective for learning when using self-directed learning environments. On the other hand, they can be helpful when processes that are not visible to the human eye are made visible together with the real phenomenon. Students must acquire, in addition to subject and process-related skills and abilities, competencies for dealing with digital media. Because of this, the professional knowledge of teachers expands to include the technical component. A variety of digital teaching and learning tools are available to teachers. With augmented reality (AR), the user is in a real environment that simultaneously contains reality-enhancing elements and enables

interaction with these AR objects. By linking real and virtual objects in space and time, contiguity can be ensured and a split-attention effect can be avoided, which can positively affect the cognitive processing of the different representations. If AR glasses are used as HMD² technology instead of tablets or smartphones to project an AR scenario, they even create an immersive experience. However, technical innovations such as AR can only be used in the future in subject teaching if the teachers accept them as a learning tool. In this context, attitudes and self-efficacy related to digital media or AR (personal characteristics) and the features of the learning environment (usability) can influence acceptance. Two empirical studies were conducted as part of this dissertation.

Main study 1 investigates teachers' acceptance of technical innovations such as AR. The study examines how the characteristics of the person and the characteristics of the learning environment are related to acceptance. For the research project, an AR learning environment was designed as a tablet variant on redox reactions using zinc iodide electrolysis as an example, which projects particle processes onto a real experiment in the form of AR representations. Furthermore, two additional learning scenarios with identical content were designed as non-AR and HMD-AR variants for use on the tablet and AR glasses. 157 STEM teachers, primarily teaching chemistry, participated in the digital presurvey to collect personal characteristics. Subsequently, the participants, divided into three groups, non-AR (N = 35), AR (N = 46), and HMD-AR (N = 41), worked through the learning environment and then completed (N = 122) the digital questionnaire on acceptance and usability. The data were analyzed according to the quantitative statistical methods of empirical social research. The results suggest that STEM teachers see opportunities and benefits in using digital media and AR for science teaching. Whereas their skills in using digital media were rated positively, the ratings of individual self-efficacy related to AR were meager. The concept of the learning environment was rated positively. The results indicate a high acceptance of technical innovations such as AR, especially in media and instructional design. Furthermore, the data demonstrate an increased acceptance of the AR learning environment on the tablet. In comparison, the AR learning environment on the AR glasses was rated more heterogeneous and seemed to be the least accepted by teachers. Considering this, a first tendency shows that mainly the different technical functions of the three learning settings (non-AR tablet vs. AR tablet vs. HMD AR glasses) led to group differences. Based on the correlation analyses, attitudes towards AR had a significant influence on usability and acceptance and, in addition, the usability characteristics of problem-oriented didactics, anticipated learning success, and individualization had a significant effect on acceptance. Consequently, usability could be identified as a mediator. Positive assessments of the potential of AR positively influenced the evaluation of the learning environment

² Head Mounted Display (AR glasses)

and increased acceptance. In particular, the didactic design of the learning environment seemed to increase its acceptance. Thus, the usability of the AR learning environment had a more significant influence on the acceptance of technical innovations than the personal characteristics.

Main Study 2 aimed to investigate the effectiveness of AR learning environments in promoting substance-particle concept understanding among chemistry teachers. In a single-factor design, chemistry teachers (N = 40) participated in a pretest and posttest. Between the two measurement time points, the experimental group (N = 20) worked with the AR learning environment and the control group (N = 20) worked with the simulation-based setting (non-AR) with the same content. Test items elaborated with thinking aloud at both measurement time points operationalized the substance-particle concept understanding. To evaluate the protocols of thinking aloud, two category systems, on substance-particle concept understanding and chemical terminology, were deductively developed and subsequently inductively adapted to the data material. Quantitative frequency analysis and qualitative content analysis of the categorizations revealed that the conceptual design of both learning environments stimulated the participants to think more deeply about the substance and particle levels. A trend showed that working with the AR learning environment led to more intensive elaboration with the substance level. The teachers of the AR group elaborated more comprehension-oriented and less search-oriented from measurement time point 1 to 2. In the pretest, both groups were diagnosed with difficulties regarding the handling of substance and particle level, based on a lack of language skills (neglect of subject terms or mixing of (M)ER). In addition, level transition was a significant challenge. After treatment, all subjects established more relationships between levels and alternated between them more decidedly. In addition, from pretest to posttest, participants focused less on plain text and tended to focus more on symbols and MER. At the same time, participants in the posttest used (M)ER more systematically in their explanations of the substance and particle levels, which favored more successful level changes. Overall, the results indicate that the AR setting had a more significant effect on cognitive processing when using substance and particle levels. The AR group differed from the simulation group in that they were visibly more diligent in using the representative level after treatment and more successful in distinguishing between the substance and particle levels.

Following these results, the effect of interactivity using (immersive) AR representations on substance-particle concept understanding was investigated in a second, qualitative sub-study as part of main study 2. Analogous to the described procedure, chemistry teachers (N = 40) participated in a pre-post test elaboration via thinking aloud. They elaborated one of the two learning environments between the two measurement time points, divided into two groups. The experimental group (N = 20) worked on the AR glasses with the HMD-AR learning environment. The control group (N = 20) elaborated a content-similar AR learning environment on the

tablet. The evaluation and qualitative content analysis as well as the quantitative frequency analysis of the categorizations relied on the same data collection and evaluation methods described above in the initial research design of main study 2. The results indicate that working with the "classic" AR setting on the tablet resulted in more extensive behavioral changes in terms of understanding substance-particle concepts than working with the AR glasses. The participants who worked with AR in the tablet format achieved more positive effects regarding their understanding of the substance-particle concept. Once again, the AR group distinguished itself from the HMD-AR group by its more diligent handling of the substance level and the more adequate level change that accompanied it. The HMD-AR group's test edits provided a more heterogeneous picture. Even though some teachers showed improved understanding of substance-particle concepts after working through the HMD-AR learning environment, their elaboration focused less on level change and more on a single level. Furthermore, it was consistently shown that the adequate handling of (M)ER regarding the specific integration of technical terms (e.g., "anions") and the explication of substance and particle levels were focused on after the treatment. Analogous to the AR group, from measurement time point 1 to 2 the form of representation *text* moved into the background, whereas symbols and MER became more important. A particular result was that the AR group tried to think more in all three levels, whereas the HMD-AR group tended to focus more on the representative level. Accordingly, the analyses provide preliminary evidence that the HMD-AR learning environment on the AR glasses positively affects chemical terminology and less substance-particle concept understanding.

INHALTSVERZEICHNIS

I	EINLEITUNG	1
II	THEORETISCHER HINTERGRUND.....	5
1	Modelle in der Naturwissenschaft	5
1.1	Definition und Bedeutung von Modellen	5
1.2	Modellieren als naturwissenschaftliche Arbeitsweise	7
2	Das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis.....	11
2.1	Denken in den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000).....	13
2.1.1	Bedeutung und Relevanz des Denkens in den drei Ebenen für das Unterrichtsfach Chemie.....	19
2.1.2	Das Teilchenmodell im Chemieunterricht.....	21
2.2	Schülervorstellungen zum Stoff-Teilchen-Modell und didaktische Herausforderungen ..	23
2.2.1	Schüler (-fehl) -vorstellungen zum Stoff-Teilchen-Konzept	23
2.2.2	Schwierigkeiten bei der Vermittlung des Stoff-Teilchen-Konzepts	26
3	Die chemische Fachsprache	28
3.1	Bedeutung und Relevanz (multipler) externer Repräsentationen	29
3.2	Representational Competence	37
3.3	Multimediales Lernen aus kognitionspsychologischer Sicht.....	38
3.4	Schwierigkeiten im Umgang mit der chemischen Fachsprache	43
4	Lehren und Lernen mit digitalen Medien	44
4.1	Relevanz digitaler Medien für den Chemieunterricht	47
4.2	Kompetenzerwartungen im Klassenzimmer.....	49
4.2.1	Kompetenzen in der digitalen Welt	50
4.2.2	Professionswissen von (angehenden) Lehrkräften	52
4.3	Digitale Lernwerkzeuge zur Förderung des Stoff-Teilchen-Konzeptverständnisses	57
4.4	Augmented Reality als innovative Technologie für den naturwissenschaftlichen Unterricht	61
4.4.1	Exemplarische AR-Lernanwendungen für den Chemieunterricht.....	66
4.4.2	Akzeptanz von Augmented Reality für den Einsatz im Unterricht	70
III	ZIELE, FORSCHUNGSFRAGEN UND HYPOTHESEN.....	76

5	<i>Zielsetzungen des Forschungsprojekts</i>	76
5.1	Forschungsfrage der Vorstudie	80
5.2	Forschungsfragen und Hypothesen von Hauptstudie 1	81
5.3	Forschungsfragen und Hypothesen von Hauptstudie 2	84
IV	<i>VORSTUDIE</i>	87
6	<i>Materialien und Methoden Vorstudie</i>	87
6.1	Stichprobe	87
6.2	Forschungsdesign und Durchführung der Vorstudie	88
6.3	Erhebungsinstrumente	88
6.3.1	Fragebogen zur Erfassung der Einstellungen und Selbstwirksamkeit hinsichtlich digitaler Medien und AR	89
6.3.2	Fragebogen zur Erfassung der Akzeptanz und Usability	96
6.4	Gestaltung der AR-Lernumgebung	103
6.4.1	Dimension Fachinhalt	105
6.4.2	Dimension Förderschwerpunkt	107
6.4.3	Dimensionen Design	111
6.4.4	Dimensionen Usability	113
6.5	Statistische Analysemethoden	115
6.5.1	Deskriptive Analyse	115
6.5.2	Itemanalyse	116
6.5.3	Reliabilitätsanalyse	116
7	<i>Ergebnisse Vorstudie</i>	118
7.1	Skalendokumentation der finalen Erhebungsinstrumente zur Erfassung der Personenmerkmale sowie Akzeptanz und Usability	118
7.1.1	Personenmerkmale	118
7.1.2	Akzeptanz und Usability	122
7.2	Zusammenfassung und Implikation für die Hauptstudien	130
7.2.1	Fragebögen	130
7.2.2	AR-Lernumgebung	132
V	<i>HAUPTSTUDIE 1</i>	136
8	<i>Materialien und Methoden Hauptstudie 1</i>	136

8.1	Stichprobe	136
8.2	Forschungsdesign	138
8.3	Gestaltung der finalen AR-Lernumgebung	139
8.3.1	Überarbeitung der Technik und des UI	140
8.3.2	Überarbeitung der fachdidaktischen Gestaltung	143
8.3.3	Überarbeitung der Instruktionen	147
8.3.4	Lernumgebungen für die Vergleichsgruppen	148
8.4	Erhebungsinstrumente	149
8.5	Durchführung von Hauptstudie 1	150
8.6	Statistische Analysemethoden	151
8.6.1	Test auf Normalverteilung.....	151
8.6.2	Reliabilitätsanalyse.....	151
8.6.3	Korrelationsanalyse.....	152
8.6.4	Regressionsanalyse	153
8.6.5	Mediatoreffekte	155
8.6.6	Varianzanalytische Verfahren	156
9	Ergebnisse Hauptstudie 1	158
9.1	Deskriptive Analyse	158
9.1.1	Skalendokumentation der Personenmerkmale	158
9.1.2	Skalendokumentation der Akzeptanz und Usability	160
9.2	Korrelationsanalysen	163
9.2.1	Zusammenhänge zwischen den Einstellungen und der Akzeptanz bzw. Usability	163
9.2.2	Zusammenhänge zwischen der Selbstwirksamkeit und der Akzeptanz bzw. Usability.....	165
9.2.3	Zusammenhänge zwischen der Usability und der Akzeptanz	165
9.3	Regressionsanalysen	166
9.3.1	Wirkung der Merkmale des Individuums auf die Akzeptanz.....	167
9.3.2	Wirkung der Usability auf die Akzeptanz	167
9.3.3	Wirkung der Merkmale des Individuums auf die Usability	168
9.3.4	Zusammenfassende Betrachtung der Regressionsanalysen	169
9.3.5	Mediatoreffekte	170
9.4	Varianz- und Kovarianzanalyse	173
9.4.1	Gruppenvergleich bezogen auf die Akzeptanz	173
9.4.2	Gruppenvergleich bezogen auf die Usability.....	175
10	Diskussion Hauptstudie 1	177

10.1	Methodische Diskussion	177
10.2	Inhaltliche Diskussion	180
VI	HAUPTSTUDIE 2	203
11	Materialien und Methoden Hauptstudie 2.....	203
11.1	Stichprobe.....	203
11.2	Experimentelle Designs.....	203
11.3	Gestaltung der Lernumgebung	207
11.4	Erhebungsinstrumente und –methoden	207
11.4.1	Prä- und Posttest	207
11.4.2	Entwicklung der Testaufgaben.....	211
11.4.3	Lautes Denken	216
11.5	Durchführung von Hauptstudie 2	218
11.6	Auswertungs- und Analysemethoden.....	219
11.6.1	Vorgehen bei der Kategorienentwicklung	222
11.6.2	Statistische Analysemethoden.....	228
12	Ergebnisse Hauptstudie 2.....	230
12.1	Finale Kategoriensysteme	230
12.1.1	Finales Kategoriensystem zum Umgang mit der Stoff- und Teilchenebene mit exemplarischen Belegen.....	230
12.1.2	Finales Kategoriensystem zum Umgang mit der chemischen Fachsprache mit exemplarischen Belegen.....	235
12.2	Gruppenvergleich zur Untersuchung der Wirksamkeit von AR auf das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis	238
12.2.1	Ausbildung unterschiedlicher Elaborationsprofile durch AR	238
12.2.2	Einfluss der chemischen Fachsprache auf das Denken in den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000)	257
12.2.3	Zusammenfassung der Ergebnisse zur Untersuchung der Auswirkungen von AR auf das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis (KAT 1 und KAT 2)	270
12.3	Gruppenvergleich zur Untersuchung der Auswirkungen der Interaktivität von AR auf das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis.....	272
12.3.1	Entwicklungen im Elaborationsverhalten durch die Interaktivität mit AR.....	272
12.3.2	Einfluss der chemischen Fachsprache auf das Denken in den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000)	285

12.3.3	Zusammenfassung der Ergebnisse zur Untersuchung der Wirkung der Interaktivität von AR auf das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis (KAT 1 und KAT 2)	296
12.4	Bewertungen der Testbearbeitungen mittels Punktesystem	297
12.4.1	Fachwissen	299
12.4.2	Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis.....	300
12.4.3	Chemische Fachsprache.....	301
12.4.4	Zusammenfassung der Bewertungen der Testbearbeitungen	301
13	<i>Diskussion Hauptstudie 2</i>.....	303
13.1	Methodische Diskussion	303
13.2	Inhaltliche Diskussion	306
VII	<i>AUSBLICK UND RELEVANZ</i>.....	323
14	<i>Implikationen für die Forschung und Praxisrelevanz für die (Hoch-) Schule</i>	323
14.1	Implikationen die fachdidaktische Lehr- und Lernforschung.....	323
14.2	Praxisrelevanz für die Schule sowie Lehreraus- und -weiterbildung.....	328
VIII	<i>VERZEICHNISSE</i>.....	334
ANHANG		383
DANKSAGUNG		556

*Alles Alte, soweit es Anspruch darauf hat, sollen wir lieben,
aber für das Neue sollen wir [...] leben.*

- Theodor Fontane -

I EINLEITUNG

„Die Digitalisierung packt uns momentan so sehr wie kaum ein anderes Thema in der letzten Dekade. Spätestens mit der Veröffentlichung der ‚Kompetenzen in der digitalen Welt‘ ist das Thema der Digitalisierung in allen Schulfächern angekommen.“

(Huwer & Banerji, 2020, S. 1)

Da die Digitalisierung bereits seit den 1970er Jahren zahlreichen Veränderungen obliegt und unsere Lebenswelt maßgeblich prägt, stehen auch Schulen vor neuen Anforderungen (Lorenz & Endberg, 2019). Hartong et al. (2019) betrachten die Digitalisierung als Phänomen, welchem entscheidende und vielfältige gesellschaftliche Transformationsprozesse zugrunde liegen. Sie subsumiert eine ansteigende Automatisierung und Vernetzung sowie die Einwirkung von künstlicher Intelligenz. Im schulischen Kontext hat sie einen starken Einfluss auf die Kernprozesse der Schulverwaltung und –aufsicht, wie Stunden-/Vertretungsplanung, Klassenbuchführung oder Leistungsdatenverwaltung. Entsprechend werden durch sie Veränderungen angeregt, welche den schulischen Akteuren (neue) unterschiedliche Rollen und Beziehungen zusprechen. Indem Bildungsprozesse fast immer digitale Daten sammeln, verstärkt die Digitalisierung die Datafizierung des Schulsystems und wirkt sich auf die Meinungsbildungs- und Entscheidungsprozesse der Schulpolitik, -aufsicht, -träger und –leitungen sowie der Lehrkräfte, Schüler, Eltern und der Öffentlichkeit aus (Hartong et al., 2019). Schließlich wurde im Jahr 2019 mit dem DigitalPakt Schule der Bundesregierung das Ziel verfolgt, Schulen in ihren Digitalisierungsprozessen zu unterstützen (Muuß-Merholz, 2019; Kabaum & Anders, 2020). Die digitale Schul- und Unterrichtsentwicklung kann dabei auf bereits mit früheren technischen Gerätschaften erprobten Konzepten fußen oder vollkommen neue Transformationen nach sich ziehen (Kabaum & Anders, 2020). Die Umstrukturierung und Weiterentwicklung der technischen Rahmenbedingungen an den Schulen, d.h. die Erweiterung der IT-Infrastruktur, nimmt eine wesentliche Rolle ein. Ferner steht der Bildungsauftrag, jungen Lernenden digitale Kompetenzen zu vermitteln, im Fokus von Schule und Unterricht (KMK, 2017). Schüler müssen auf das Leben in einer digitalisierten Welt vorbereitet werden (Lorenz & Endberg, 2019). Entsprechend kommt Lehrkräften eine Schlüsselfunktion zu, wenn es um das Lehren und Lernen mit digitalen Medien geht (Huwer et al., 2021; *K19+ - Rahmenmodell Der Kernkompetenzen*, 2023; Köhler & Mishra, 2009). Das Professionswissen setzt sich nicht mehr länger nur aus den (Schnitt-) Mengen des fachlichen, fachdidaktischen und pädagogischen Wissens (Borowski et al., 2010) zusammen, sondern wird um eine technische bzw. digitale Komponente erweitert (Huwer et al., 2020; Huwer et al., 2019; Köhler & Mishra, 2009). Folglich müssen Lehrkräfte das Potenzial digitaler Medien für den Fachunterricht ausschöpfen (Lorenz & Endberg, 2019).

Dabei erfordert der digitalgestützte Unterricht die situations- und adressatengerechte Vermittlung von Fachinhalten durch die Lehrkraft (Hartmut, 2004). Insbesondere im MINT-Unterricht erweisen sich digitale Lehr- und Lernszenarien vielversprechend für den kumulativen Wissensaufbau. Dem Konstruktivismus folgend können mithilfe digitaler Medien gezielt aktive und reflexive Lernprozesse gefördert werden. Nerdel und Kotzebue (2020) betonen, dass innovative Techniken als Kernelement naturwissenschaftlicher Denk- und Arbeitsweisen anzusehen sind. Sensoren im Smartphone zur automatischen Messwerterfassung, Lernvideos, Formel-Apps oder virtuelle Lernlabore können das Lernen sowie Experimentieren bereichern (vgl. Huwer et al., 2020). Ein grundlegendes wissenschaftliches Verständnis stützt sich auf den Fähigkeiten, naturwissenschaftliche Fragestellungen zu erkennen, vorhandenes Wissen auf diese anzuwenden und begründete Schlussfolgerungen herstellen zu können. Digitale Medien dienen demnach als Kommunikationsmittel und zeigen sich mit Blick auf das Lesen, Schreiben, Präsentieren und Diskutieren vor allem im Unterrichtsfach Chemie lernförderlich. Sie können zur Erlangung fachlicher und prozessbezogener Kompetenzen eingesetzt werden und als kommunikatives sowie kognitives Hilfsmittel die Informationsverarbeitung, -speicherung und -übermittlung begünstigen (Nerdel & Kotzebue, 2020; Petko, 2018; Schnotz, 2014). Entsprechend werden ihnen im Chemieunterricht als Lernwerkzeug, Lernbegleiter oder Experimentalwerkzeug unterschiedliche didaktische Funktionen zugeschrieben (vgl. Huwer & Brünken, 2018). Digitale Lernarrangements in Form von Animationen oder Simulationen wurden für das Lernen im Fach Chemie bereits vielfach untersucht und besitzen aus fach- und mediendidaktischer Perspektive zahlreiche Vorteile, um ein fundiertes chemisches Grundverständnis aufzubauen (vgl. Landriscina, 2009; Miesera et al., 2018; Peperkorn & Schwedler, 2021). Ihr Potential wird vor allem bei der Modellierung chemischer Sachverhalte deutlich (Schnitker, 2016). Das Unterrichtsfach Chemie trägt die Schwierigkeit in sich, dass chemische Phänomene zwar mit den menschlichen Sinnen wahrgenommen werden können, Strukturen und Prozesse auf Teilchenebene aber unsichtbar sind (Mikelskis-Seifert, 2002). Damit bleiben dem Menschen essenzielle Informationen zur Erklärung der stofflichen Welt unzugänglich. Sie sind jedoch von größter Bedeutsamkeit für die Wissenserweiterung im Fach Chemie. Nachdem Teilchenprozesse leicht bis höchst komplex sein können und hinsichtlich der kognitiven Verarbeitung einem vielfältigen Abstraktionsniveau zugrunde liegen, wird der chemischen Fachsprache für das Herstellen von Beziehungen zwischen Stoff- und Teilchenebene eine essenzielle Rolle zugesprochen (Leisen, 2005; Johnstone, 2000). Naturwissenschaftliche Theorien, Konzepte und Verfahren können mit der Vielzahl an Repräsentationsformen beschrieben und erklärt werden (vgl. Harrison & Treagust, 2000; Kozma & Russell, 2005; Ainsworth, 1999; Nerdel, 2017). Junge Lernende sowie Lehrende haben oftmals Schwierigkeiten im adäquaten Umgang mit den verschiedenen chemischen Darstellungsformen (Talanquer, 2011; Kozma & Russell,

2005). Demnach ist die Ausbildung eines angemessenen Stoff-Teilchen-Konzeptverständnisses sehr komplex (Chittleborough & Treagust, 2007; Treagust et al., 2004; van Driel & Verloop, 1999). Als Stellschrauben können es digitale Medien ermöglichen, Teilchenprozesse mittels diverser Repräsentationen zu modellieren (vgl. Probst et al., 2022; Schnitker, 2016) und derart den Problemen beim dezidierten Wechsel von Stoff- und Teilchenebene entgegenzuwirken. Dabei sind die Möglichkeiten, digitale Lehr- und Lernszenarien in den Chemieunterricht zu implementieren, sehr vielfältig. Gestützte Hilfekarten in Form von QR-Codes, digitale Kartenabfragen zur kognitiven Aktivierung, Videofilme zur Beschreibung eines Versuchs, Erklärvideos oder Animationen zur Veranschaulichung komplexer naturwissenschaftlicher Teilchenprozesse und zahlreiche weitere digitale Lernarrangements finden mittlerweile Anwendung im Fachunterricht (Nerdel & Kotzebue, 2020; Miesera et al., 2018; Berney & Betrancourt, 2016). Dabei ist es vor allem die Stärke digitaler Medien dynamische Abläufe modellhaft zu demonstrieren (Frick, 2019) und in Hinblick auf die Haptik mittels diverser multimedialer Lernumgebungen unterschiedliche Lernaktivitäten anzusprechen (Chi & Wylie, 2014). Schließlich gilt es an dieser Stelle zu betonen, dass der Einsatz digitaler Medien nicht zwangsläufig zu besseren Lernerfolgen führt (vgl. Romrell et al., 2014). Effizient für das Lehren und Lernen im Fach Chemie zeigen sich digitale Lernszenarien erst durch eine adäquate und reflektierte didaktische Rahmung durch die Lehrkraft. In den letzten Jahren stieg die Anzahl unterrichtsrelevanter Beiträge aus den Fachdidaktiken, die sich mit den Stärken und Schwächen technischer Innovationen wie Augmented Reality (AR) für den kumulativen Wissensaufbau beschäftigen, stetig an (Krug et al., 2021; Lim & Habig, 2020). Als High-Tech-Technologie erlaubt Augmented Reality die Einbindung virtueller Objekte in eine reale Umgebung und verknüpft damit reale und digitale Welt (Azuma, 1997). Dabei konstatiert die Lehr-Lernforschung, dass Augmented Reality Lehr- und Lernprozesse positiv beeinflussen kann (Cai et al., 2017; Keller et al., 2021; Probst et al., 2022; Probst et al., 2020; Tschiersch et al., 2021). Eine große Chance wird in der neuartigen Technologie hinsichtlich ihres Potentials für die Veranschaulichung von naturwissenschaftlichen Phänomenen gesehen, indem „Unsichtbares“ sichtbar gemacht wird (Huwer et al., 2019; Lauer & Peschel, 2021; Schwanke & Trefzger, 2021).

Daher ist es das Ziel dieser Arbeit, die Wirksamkeit von Augmented Reality für den Chemieunterricht zu untersuchen. Während die Stoffebene realitätsnah und anschaulich ist, zeigt sich die Teilchenebene sehr abstrakt. Eine Brücke zwischen diesen beiden Ebenen kann die Digitalisierung mit ihren umfangreichen Darstellungsformen schlagen (vgl. Ainsworth, 1999; Eitel & Scheiter, 2015; Nerdel & Kotzebue, 2020). Im Vergleich zu „geläufigen“ traditionellen digitalen Werkzeugen, liefern virtuelle Anwendungen gänzlich neue Lösungsansätze, um statische und dynamische Modellierungen vorzunehmen (vgl. Keller & Habig, 2022; Buchner & Kerres, 2021; Buchner & Freisleben-Teutscher, 2020; Altmeyer et al., 2020). Insbesondere Augmented Reality sollte mit Blick auf die kognitionspsychologische Gestaltung eine fach- und

mediendidaktische Stärke besitzen, die differenziert auf die Bedürfnisse von Lernenden eingeht, Lernprozesse gezielt unterstützt (vgl. Kerres, 2018; Romrell et al., 2014) und infolgedessen ein vollkommen neues multimediales Lernen ermöglicht (Schnotz, 2001; Mayer, 2014; Domagk et al., 2010). Werden virtuelle Teilchenprozesse räumlich und zeitlich mit einem realen Versuchsablauf vereint, so wird Kontiguität sichergestellt und eine geteilte Aufmerksamkeit, welche durch das Hin- und Herschweifen von Blickbewegungen zwischen zwei Medien oftmals begünstigt wird, vermieden (Ayres & Sweller, 2021; Fiorella & Mayer, 2021). Angesichts dessen erlaubt Augmented Reality die Integration unterschiedlicher zwei- und dreidimensionaler Repräsentationen, die interaktiv gesteuert werden können (Azuma, 1997; Akçayır & Akçayır, 2017). Da Augmented Reality zudem unterschiedliche Ausprägungen annehmen kann, begünstigt die Technologie ein immersives Erleben, welches unterschiedliche Interaktionspotentiale mit sich bringt (Lauer & Peschel, 2021). Daher soll mithilfe dieser Dissertationsarbeit untersucht werden, ob Augmented Reality den Wechsel von Stoff- auf Teilchenebene (und umgekehrt) sowie den Umgang mit der chemischen Fachsprache bei Chemielehrkräften nachhaltig fördern kann. Mit Blick auf die verschiedenen Hardwaresysteme werden verschiedene AR-Lernszenarien, sowohl auf dem Tablet als auch auf der AR-Brille, hinsichtlich ihrer Lernwirksamkeit untersucht. Infolgedessen soll die Studie Lehrpersonen für technische Innovation in der zukünftigen Berufswelt der Schüler und den Umgang mit ihnen sensibilisieren.

II THEORETISCHER HINTERGRUND

1 Modelle in der Naturwissenschaft

Stoff- und Energieumwandlungen basieren auf chemischen Reaktionen und damit zusammenhängend auf der Neubildung von chemischen Bindungsverhältnissen (KMK, 2005). Sie sind der sinnlichen Wahrnehmung aber nur auf der makroskopischen Ebene zugänglich. Sobald Strukturen mit dem bloßen Auge schwer zu beobachten sind, können mit Blick auf die kleinste oder größte Dimension Werkzeuge wie (Elektronen-) Mikroskope oder Ferngläser bzw. Teleskope Abhilfe schaffen. Entziehen sich die Strukturen der menschlichen Wahrnehmung vollkommen, so handelt es sich um den submikroskopischen oder astronomischen Bereich (Thiele et al., 2005). Aufgrund der Auflösungsgrenzen menschlicher Sinnesorgane können Strukturen des submikroskopischen Bereichs, trotz verbesserter Techniken (z.B. in der Optik), vom Individuum nicht identifiziert werden (vgl. Thiele et al., 2005). Folglich modellieren Naturwissenschaftler das beobachtbare Phänomen, um die stofflichen Eigenschaften und ihre Veränderungen nachvollziehen und erläutern zu können (Chittleborough & Treagust, 2007; Justi & Gilbert, 2002; Stachowiak, 1980). Es wird dann auf Modelle als Hilfsmittel zum Beobachten zurückgegriffen, die zur Visualisierung des nicht Beobachtbaren dienen (Crawford & Cullin, 2004; Turro, 1986). Entsprechend sind Modelle wesentlicher Bestandteil des naturwissenschaftlichen Denkens und Arbeitens (Crawford & Cullin, 2004; Hammond et al., 1976; Harrison & Treagust, 2000). Sie bilden eine Brücke zwischen der Wissenschaft mit all ihren Theorien und der beobachtbaren Realität (Gilbert, 2004). Demnach stehen insbesondere Lehrkräfte vor einer großen Herausforderung, wenn es darum geht naturwissenschaftliche Phänomene im Klassenzimmer verständlich zu machen (Harrison & Treagust, 2000). Oftmals ist es aufgrund mangelnder Zeit oder Sicherheit kaum möglich, chemische Reaktionen experimentell durchzuführen und die ablaufenden Prozesse zu verdeutlichen (Harrison & Treagust, 2000). Als Unterrichtsstrategien kommen Modelle zum Einsatz, die bereits im Sachunterricht in Grundschulen zur Unterstützung des kumulativen Wissensaufbaus Anwendung finden (Gilbert, 2004; Harrison & Treagust, 2000; Häußler et al., 2015). Mit ihrer hohen Zugänglichkeit und ihrer motivationssteigernden Fähigkeit bei jungen Lernern sind sie ein unerlässliches Werkzeug für Beschreibungen und Erklärungen im Chemieunterricht (Harrison, 1996).

1.1 Definition und Bedeutung von Modellen

Der Begriff *Modell* wird im wissenschaftlichen und alltäglichen Sprachgebrauch unterschiedlich genutzt (Harrison, 1996). Verschiedene Vorstellungen im Laufe der letzten Jahrzehnte erschweren die exakte Begriffsdefinition (Thiele et al., 2005). Je nach Lebensweltbezug oder Fachbereich besitzt das Modell ein weites Spektrum an Bedeutungen (Leisner-Bodenthin, 2006; Thiele et al., 2005; Upmeyer zu Belzen & Krüger, 2010). Dabei stützt sich der Modellbe-

griff auf der Fachliteratur, der fachdidaktischen Alltagssprache und den Präkonzepten von jungen Lernern (Fleige et al., 2012; Häußler et al., 2015). Ein Modell kann zunächst als maßstabsgetreue Verkleinerung oder Vergrößerung eines realen Objekts oder Phänomens verstanden werden (vgl. Gilbert, 2004; Harrison & Treagust, 2000). Die Definition des Modells geht jedoch weit über die mathematische Ähnlichkeit von Objekten hinaus (Häußler et al., 2015). Modelle sind nicht nur zentrische Streckungen von ihren Urbildern, den realen Gegenständen, vielmehr kann es sich um idealisierte, alternative Darstellungen von Konzepten, Systemen oder Objekten handeln (Crawford & Cullin, 2004; Thiele et al., 2005; Turro, 1986). Sie sind vereinfachte Repräsentanten der Realität (Steinbuch, 1977). Vereinzelt, ähnliche Entitäten des Originals können aufgedeckt werden (Gilbert, 2004; Häußler et al., 2015) ohne dabei stringent auf weitere, entferntere Entitäten im Modell übertragen zu werden (Häußler et al., 2015). Da direkte Operationen an chemischen Phänomenen oder Objekten oftmals unmöglich sind, wird durch den Einsatz von Modellen eine Zugänglichkeit zum Urbild geschaffen mit deren Hilfe neue Erkenntnisse über das reale Objekt gewonnen, Probleme gelöst, Vorhersagen getroffen und Erklärungen angestellt werden können (Crawford & Cullin, 2004; Häußler et al., 2015; Pfeifer et al., 2002). Es ist jedoch nicht nur die Beziehung zwischen Modellobjekt und Modell, auch dem Modellbenutzer wird in der Begriffsdefinition eine tragende Rolle zugesprochen (Häußler et al., 2015). Demzufolge kann ein Modell vom Individuum selbst neukreiert oder ein bereits bestehendes Modell für eigene Zwecke genutzt bzw. angewandt werden (vgl. Mikelskis-Seifert et al., 2005; Upmeyer zu Belzen & Krüger, 2010). Ferner können Modelle stets weiterentwickelt, ausgebaut oder vom Subjekt verworfen werden (vgl. Turro, 1968; Vosniadou, 1994). Als Produkte, Methoden sowie Lehr- und Lernmittel sind sie unverzichtbar für den Lernprozess von jungen Lernenden im Fach Chemie (Crawford & Cullin, 2004; Harrison & Treagust, 2000; Häußler et al., 2015; Pfeifer et al., 2002). Werden nun die tiefergehenden Strukturen von Modellen betrachtet, zeigt sich, dass nicht nur gegenständliche Modelle in der Chemie Anwendung finden. Gilbert (2004) führt mentale Modelle an, die als private und persönliche Darstellungen, konstruiert von einer Person oder einer Gruppe, verstanden werden können und für andere Menschen per se nicht greifbar sind. Eine Version dieser Modellvorstellung kann anderen Personen als Anschauungsmodell zugänglich gemacht werden, indem sie durch Repräsentation zum Ausdruck gebracht wird (Gouvea & Passmore, 2017; Häußler et al., 2015; Steinbuch, 1977; Gilbert, 2004). Demzufolge sind Modelle Replikat von Realitätsausschnitten, die laut Stachowiak (1973) durch die drei folgenden wesentlichen Merkmale gekennzeichnet sind und das Verhältnis zwischen Modell und Original, d.h. Ur- und Abbild, demonstrieren:

- I. Abbildungsmerkmal. Modelle sind homomorphe oder isomorphe Abbildungen, die nicht identisch mit dem Original sind.
- II. Verkürzungsmerkmal. Modelle besitzen lediglich dem Konstrukteur wichtig erscheinende Eigenschaften und demonstrieren keinesfalls alle Kennzeichen des Urbilds.
- III. Subjektivierungsmerkmal. Modelle können dem Urbild nicht eindeutig zugeordnet werden. Vielmehr werden sie für einen bestimmten Untersuchungszweck geschaffen und können folglich unterschiedliche Gestalt annehmen. Damit haben sie eine Ersetzungsfunktion im Hinblick auf die modellbenutzende Person, der zeitlichen Einordnung und der Einschränkung auf gedankliche oder reale Operationen.

Nach Upmeier zu Belzen und Krüger (2010) können Modelle als lebensnahe Replikationen, idealisierte Repräsentationsformen oder theoretische Konstrukte angesehen werden, denen je nach Klassifizierung ein medialer oder materieller Charakter obliegt (Justi & Gilbert, 2002a, 2002; Nerdel, 2017; Upmeier zu Belzen & Krüger, 2010). Es wird daher konkludiert, dass Modelle als facettenreiche Abstraktionen der Realität zu betrachten sind. Sie stellen materiell oder ideell in Form von Gegenständen, Gedankenkonstrukten oder Repräsentationsformen Relationen, Funktionen sowie Strukturen von naturwissenschaftlichen Phänomenen, Systemen oder Objekten dar. Dabei bilden sie nicht alle Aspekte, sondern lediglich die für den Betrachter notwendig erscheinenden, spezifischen Eigenschaften des Originals für eine bestimmte Zeit und einen bestimmten Zweck, ab (vgl. Turro, 1968; Stachowiak, 1973; Hammond et al., 1976; Goldkuhle, 1993; Pfeifer et al., 2002; Gilbert, 2004; Mikelskis-Seifert et al., 2005; Häußler et al., 2015; Gouvea & Passmore, 2017; Upmeier zu Belzen & Krüger, 2010).

1.2 Modellieren als naturwissenschaftliche Arbeitsweise

Modelle sind wesentliche Stützen für die (Weiter-) Entwicklung fachbezogener und prozessbezogener Kompetenzen, da sie aufgrund ihrer hohen Erklärungsmächtigkeit gezielt das naturwissenschaftliche Arbeiten unterstützen können (Eilks, 2008; Nerdel, 2017; Upmeier zu Belzen & Krüger, 2010). Leisner-Bodenthin (2006) verweist auf das deklarative und prozedurale Wissen, welche sich im Umgang mit Modellen gegenseitig beeinflussen und mit dem Selbstständigkeitsgrad des Individuums wechselwirken. Das deklarative Wissen subsumiert demnach das Modellverständnis und das faktische Wissen über Modelle hinsichtlich ihrer Eigenschaften und ihres Inhalts (Anderson, 1995; Leisner-Bodenthin, 2006). Das prozedurale Wissen fokussiert die konkrete Modellierung auf Grundlage des Modellverständnisses (vgl. Anderson, 1995; Leisner-Bodenthin, 2006). Hierbei werden die Fähigkeiten des Individuums bei der Nutzung von Modellen angesprochen (Leisner-Bodenthin, 2006). Demnach kann in Bezug auf Modelle zwischen einer Herstellungs- und Anwendungsperspektive unterschieden werden (Leisner-Bodenthin, 2006; Mahr, 2008; Upmeier zu Belzen & Krüger, 2010). Mahr (2008) beschreibt die Modellherstellung als induktiven Prozess, der bei einer realen Ausgangslage, dem chemischen Sachverhalt, beginnt und über kognitive Verarbeitungsprozesse hinweg mit einem

Modellobjekt endet. Es wird ein Modell *von etwas*, das kognitive Wissensstrukturen wie Theorien, Hypothesen, Ideen usw. beinhaltet, vom Individuum konstruiert. Im weiteren Verlauf wird dieses Denkmodell in ein Modellobjekt, das als Anschauungsmodell angesehen werden kann, übersetzt (Mahr, 2008). Bei der Herstellung von Modellen wird vor allem das prozedurale Wissen beansprucht (Leisner-Bodenthin, 2006). Als Modell *für etwas* steht das Modellobjekt sodann für die zweckgerichtete Anwendung zur Verfügung, indem es ein induktives Vorgehen innehält (Mahr, 2008; Upmeier zu Belzen & Krüger, 2010; Fleige et al., 2012). Es ist ein Anschauungsmodell, das sowohl für die Erkenntnisvermittlung als auch für die Erkenntnisgewinnung genutzt werden kann (Halloun, 2007; Upmeier zu Belzen & Krüger, 2010). Auch Justi und Gilbert (2002) betonen, dass dem Denken mit und in Modellen ein Zweck zugrunde liegt, der nach der Konstruktion von mentalen Modellen bis hin zu Anschauungsmodellen einen Modelleinsatz forciert. Ziel der Modellierung muss der erkenntnisbringende Rückbezug zum Original sein (vgl. Fleige et al., 2012; Upmeier zu Belzen & Krüger, 2010; Mikelskis-Seifert et al., 2005). Ausgehend von dem Original werden Beobachtungen angestellt und Daten, die in Wechselwirkung mit den Präkonzepten und vorwissenschaftlichen Gedanken einen Modellbau initiieren, experimentell ermittelt (Steinbuch, 1977). Es folgt sodann die Hypothesengenerierung – und Prüfung (Fleige et al., 2012). Dieser Prozess beinhaltet mehrere kognitive Teilprozesse (Justi & Gilbert, 2002).

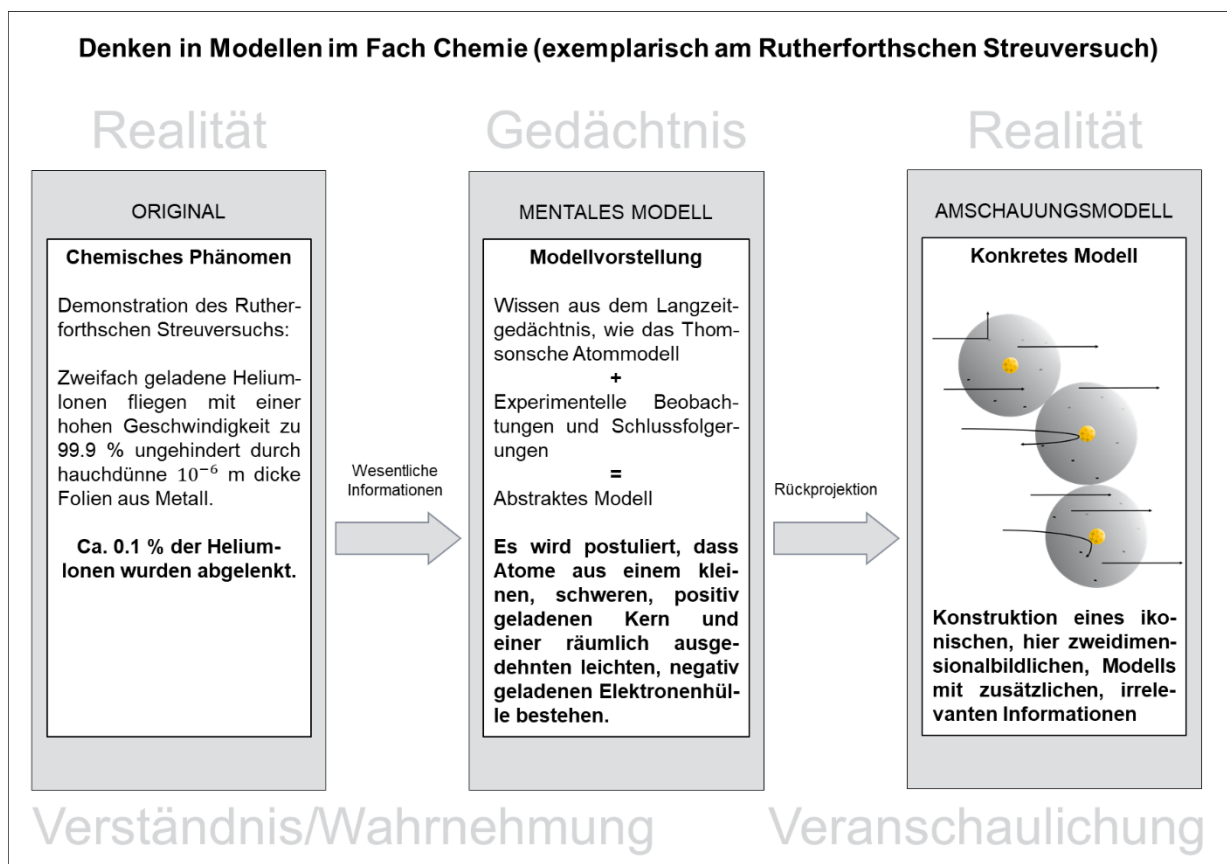


Abbildung 1. Denken in Modellen am Beispiel des Atommodells nach Rutherford (erweitert und adaptiert von Steinbuch, 1977; orientiert an Holleman & Wiberg, 1995 und Riedel, 2010).

In diesem Zusammenhang lässt sich Steinbuchs (1977) Ansatz anführen, der das Denken in Modellen in zwei wesentliche Schritte untergliedert: Die Konstruktionen von Denk- und Anschauungsmodellen (vgl. Abbildung 1). Exemplarisch wird am Atommodell von Rutherford erläutert, welche möglichen Denkprozesse bei der Modellbildung vonstattengehen können, um zu hinterfragen, welche kognitiven Prozesse Rutherford möglicherweise durchlief als er zu seinen Erkenntnissen zum Aufbau von Atomen kam (vgl. Abbildung 1). Da sich Atome aufgrund ihres submikroskopischen Charakters der Wahrnehmung des Menschen entziehen, versuchten schon Dalton oder Thomson Modelle zu konstruieren, mit welchen die Beschaffenheit von Atomen erklärt werden sollte (vgl. Holleman & Wiberg, 1995; Riedel, 2010). Folglich führte Rutherford ein Experiment durch, indem er α -Helium-Teilchen auf eine Gold-, Platin-, Silber- und Kupferfolie schoss und den Versuchsablauf beobachtete. Der Versuch wird dabei mit dem realen, unbekanntem chemischen System als Original gleichgesetzt und kann hinsichtlich der Untersuchung der unbekannteten Atomstruktur als Blackbox betrachtet werden (Winde, 1977). Experimentelle Informationen werden als Input in das experimentelle System eingegeben und Ergebnisse als Output ausgeworfen. Rutherford beobachtete an diesem realen System, dass 99.9 % der α -Helium-Teilchen durch die Folie hindurchflogen und ein geringer Teil mit 0.1 % abgelenkt wurde (Mortimer, 1980; Häußler et al., 2015). Gemäß Steinbuch (1977) sind es die Wahrnehmungen des realen Experiments, die den Betrachter dazu verleiten, bedeutsame Merkmale zu filtern und in ein Denkmodell im Gedächtnis zu übersetzen (s. Abbildung 1). Nach Beobachtung des Experiments wurden für die Konstruktion des Denkmodells beispielsweise die Elemente per se oder die Positionen der Ablenkungen auf der Folie vernachlässigt. Die Tatsache, dass es sich um eine Gold-, Platin-, Silber- und Kupferfolie handelte, wurde nicht spezifisch in das Denkmodell eingebaut, sondern diente im Experiment zur Verbreiterung der Datenbasis für die Verallgemeinerung des Modells. Er fokussierte sich daher auf das Wesentliche und generalisierte die Informationen auf alle Atome. Demnach wurden jene neuen Informationen aus der Realität mit dem bereits vorhandenen Vorwissen aus dem Langzeitgedächtnis verknüpft (Steinbuch, 1977; Anderson, 1995). Er vernetzte die bestehenden „alten“ Denkmodelle des Langzeitgedächtnisses, beispielsweise das Atommodell nach Thomson, mit den realen Wahrnehmungen des Experiments, durch Internalisierung der beobachteten Informationen im Arbeitsgedächtnis (vgl. Steinbuch, 1977; Winde, 1977; Mortimer, 1980; Justi & Gilbert, 2002; s. hierzu auch Kapitel 3.3). Zusätzliche Informationen, wie die nach außen neutrale Ladung des Atoms, mit positiven und negativen Teilladungen, könnten die Bildung des neuen Denkmodells begünstigt haben (vgl. Steinbuch, 1977). Entsprechend wird das Vorwissen mit den neuen Wissensstrukturen im Gedächtnis zur Hypothesenbildung vernetzt. Es könnte sich so Rutherfords Postulat entwickelt haben, dass Atome aus einem kleinen schweren, positiv geladenen Kern und einer räumlich ausgedehnten leichten, negativ geladenen Elektronenhülle

bestehen müssen (Mortimer, 1980; Steinbuch, 1977). In Form rekursiver, kognitiver Verarbeitungsprozesse simplifiziert das Denkmodell die reale Struktur von Atomen und stellt mental eine Hypothese auf, durch deren Ableitung sich eine Theorie generiert (vgl. Justi & Gilbert, 2002; Upmeier zu Belzen & Krüger, 2010). Dieser erste Transformationsschritt, der bei Steinbuch (1977) als Verständnis bzw. Wahrnehmung betitelt wird (s. Abbildung 1), beinhaltet laut Winde (1977) die Erkenntnisgewinnung. Die Wahrnehmung vernetzt sich durch die Beobachtung, Abstraktion, Verallgemeinerung und dem induktiven Schließen mit den vorwissenschaftlichen Erkenntnissen und führt zu einer neuen wissenschaftlichen Erkenntnis in Form von Hypothesen und Theorien durch Begriffsbildung und logischem Schließen (Vollmer, 1990; Upmeier zu Belzen & Krüger, 2010). Im Anschluss kann die abstrakte Modellvorstellung als Anschauungsmodell und Modell *für etwas* in die Realität zurückprojiziert werden (vgl. Steinbuch, 1977; Häußler et al., 2015; Upmeier zu Belzen & Krüger, 2010; Gouvea & Passmore, 2017). Das Denkmodell wird bildlich konkretisiert und der einstige chemische Sachverhalt, die atomare Struktur, anschaulich, jedoch nicht maßstabsgetreu, als Modellobjekt in der Realebene repräsentiert (s. Abbildung 1; Steinbuch, 1977; Goldkuhle, 1993; Mortimer, 1980; Mahr, 2008; Upmeier zu Belzen & Krüger, 2010; Gouvea & Passmore, 2017). Schließlich kann die Rückprojektion mit einer Vielzahl an Darstellungsarten bzw. Modelltypen medial erfolgen (vgl. Harrison & Treagust, 2000; Gouvea & Passmore, 2017). Nach Steinbuch (1977) ergänzen irrelevante Informationen das Anschauungsmodell. In dem vorgestellten Beispiel handelt es sich dabei um die angeordneten Elektronen, die in gleicher Anzahl wie die im Kern befindlichen Protonen eingezeichnet wurden (s. Abbildung 1). Diese symbolischen Zusatzinformationen verdeutlichen die submikroskopische Atomstruktur, wurden jedoch erweiternd zu dem bestehenden Denkmodell eingefügt.

Der beschriebene Prozess zum Denken in Modellen am Beispiel des Rutherford'schen Streuversuchs zeigt auf, dass aufeinander aufbauende Hierarchien von Denkmodellen möglich sind. Eine Erweiterung von bestehenden mentalen Wissensstrukturen durch neue Informationen impliziert den einfachsten Fall der Neubildung von Denkmodellen (vgl. Vosniadou, 1994). Oftmals sind auch Neuanpassungen, Veränderungen und Vernichtungen von Modellen erforderlich. Mehrere Modelle können nur dann zeitgleich existieren, wenn sich kohärent über- bzw. untergeordnete (Sub-) Strukturen etablieren lassen (Steinbuch, 1977; Vosniadou, 1994). Dabei liegen Modellkonstruktionen einem subjektiven Verständnis zugrunde und weisen unterschiedlich stark ausgeprägte Grenzen auf (vgl. Stachowiak, 1973). Modell und Original müssen miteinander häufig in mehreren iterativen Probeläufen verglichen werden, damit sich eine Modellkritik anschließen kann, die die hinreichende Güte bestätigt oder revidiert (Goldkuhle, 1993). Widersprechen sich die neuen und alten Denkstrukturen, wird eine Veränderung des bestehenden mentalen Modells forciert (Justi & Gilbert, 2002). Der kognitive Konflikt hinterfragt sodann den zweckgebundenen Einsatz des Modells und führt zu einer Neukonstruktion des

Denkmodells (Barke, 2006; Fleige et al., 2012; Krüger, 2007; Vosniadou, 1994). Wiederkehrende Gedankenstöße regen das Individuum an in zyklischen Abläufen den Modellierungsprozess zu erneuern oder zu optimieren (Goldkuhle, 1993; Justi & Gilbert, 2002; Upmeier zu Belzen & Krüger, 2010). Kann das Modellobjekt für die eigenen Forschungen eingesetzt werden und zeigt sich lernwirksam, können die Modellgrenzen evaluiert werden und sich Modellanpassungen für weitere andere Bereiche anschließen (Justi & Gilbert, 2002; Fleige et al., 2012). Entsprechend ist das Denken in Modellen von großer Bedeutsamkeit für das Lehren und Lernen der Naturwissenschaft (vgl. Hammond et al., 1976; Harrison & Treagust, 2000; Pfeifer et al., 2002; Häußler et al., 2015; Gouvea & Passmore, 2017). Dabei unterstützt es Lernende transferfähiges sowie anwendbares Wissen zu erzeugen und in den Naturwissenschaften zu kommunizieren (Upmeier zu Belzen & Krüger, 2010).

2 Das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis

Chemische Modellierungen werden vor allem zur Herstellung von Beziehungen zwischen der beobachtbaren Welt und ihren visuell nicht wahrnehmbaren Teilchen (-prozessen) vollzogen (Harrison & Treagust, 2000; Mikelskis-Seifert, 2002). Strukturen und Eigenschaften von Stoffen sind durch die Art, Anzahl, Anordnung und Wechselwirkung der submikroskopischen Teilchen charakterisiert. Doch was genau ist unter dem Teilchenbegriff zu verstehen? Wie grenzt sich dieser von der stofflichen Ebene ab? Nachstehend werden die Begrifflichkeiten *Stoff* und *Teilchen* definiert, um deren Bedeutung für das Fach Chemie näher zu beschreiben:

Der Stoffbegriff. Im chemischen Kontext stellt dieser Begriff den Grundstock für sämtliche experimentelle Untersuchungen zur Klärung unserer Lebenswelt dar (Schmidt, 2010). Im Zentrum des Fachs Chemie stehen Stoffe und ihre Umwandlungen (ISB, 2023c). Des Öfteren werden für den Begriff *Stoff* die Termini *Material* oder *Substanz* verwendet (ZPG Chemie, 2016). In der Physik findet sich häufiger die Bezeichnung *Körper*, welche einen Gegenstand, ein Ding, eine Sache oder ein Objekt beschreibt (Schmidt, 2010). Da stoffliche Eigenschaften durch Körper (bzw. Gegenstände nach Schmidt, 2010) zugänglich werden, scheinen die Begriffe *Stoff* und *Körper* nur schwer getrennt werden zu können. In Hinblick auf die Eigenschaften werden Körpern extensive und Stoffen intensive Stoffeigenschaften zugesprochen (Schmidt, 2010; Krnel et al., 1998). Dabei sind intensive Stoffeigenschaften nach äußerem Einwirken, wie zum Beispiel bei einem Bruch, beständig (z.B.: Dichte, Geruch, Härte, Reaktivität, Aggregatzustand, Farbigkeit oder Geschmack). Extensive Eigenschaften verändern den Körper bezogen auf seine Masse, sein Volumen oder seine Größe (Krnel et al., 1998). Die Unterscheidungen verdeutlichen, dass Stoffe messbare Eigenschaften wie die Ermittlung der Dichte, der Schmelz- und Siedetemperatur oder der Löslichkeit besitzen (Schmidt, 2010). Leerhoff (2003) charakterisiert Stoffe dadurch, dass man sie anfassen oder in einem Gefäß aufbewahren kann. Zusätzlich sollten, neben der haptischen Wahrnehmung, in Anlehnung an Johnstone (1993,

2000) die weiteren Sinnesmodalitäten wie das Sehen und dessen Wichtigkeit für das Anstellen von Beobachtungen im Fach Chemie (ISB, 2023c) berücksichtigt werden. Dabei greift die Chemie auf mehrere weitere Begrifflichkeiten der Stoffebene zurück, die sich dem Stoffbegriff per se unterordnen lassen (nach ZPG Chemie, 2016):

- I. *Reinstoffe* bestehen aus einer Sorte an Stoffteilchen.
- II. *Gemische* stellen eine Vermischung mehrerer Reinstoffe dar.
- III. Elemente sind Reinstoffe, deren Zerlegung in Reinstoffe durch chemische Reaktion nicht möglich ist (z.B. Schwefel).
- IV. *Verbindungen* sind Reinstoffe, deren Teilchen aus verschiedenen Atomarten aufgebaut sind. Sie können durch chemische Reaktion in mindestens zwei Reinstoffe zerlegt werden (z.B. das Ionengitter von Natriumchlorid oder Wassermoleküle).

Der Teilchenbegriff. Nach Schmidt (2010) ist die fachliche Genese des Teilchenbegriffs auf die Entwicklungen des Atombegriffs zurückzuführen: Die Überlegungen zur Begriffsdefinition von Teilchen gehen auf die naturphilosophische Betrachtung in der Antike zurück, die von der Atomhypothese motiviert wurden. Vor rund 2500 Jahren postulierten die griechischen Philosophen Leukipp und Demokrit (460-400 v. Chr.), dass sich die Materie aus vorgebildeten Grundbausteinen zusammensetzt, die vergleichbar mit einem Diskontinuum weder teilbar noch vergänglich sind. Stoffe wären demnach aus unteilbar kleinsten Stoffen, also Atomen, aufgebaut (Schreiber, 2013). Dies entspräche unserer heutigen Auffassung, dass sich Atome mit elementaren einatomigen Strukturen oder Molekülen sowie Ionen usw. im „Nichts“, dem leeren Raum, bewegen. Die Meinung der Philosophen Aristoteles und Platon (428-322 v. Chr.), als Gegner des Atomismus, war, dass die wiederholte Teilung von Körpern kein Ende habe. Daher wurde beispielsweise die Annahme getätigt, dass teilbare kleine Teilchen sämtliche Qualitäten eines Stoffes aufweisen würden (Johannesmeyer, 2004). Der „horror vacui“ manifestierte ihren Ansatz des kontinuierlichen Aufbaus von Materie, welcher als Kontinuums-theorie nahezu zwei Jahrtausende gelehrt wurde (Barke, 2006). Erst mit Dalton (1803) wurde der Atombegriff erneut aufgenommen und mit der Diskontinuumshypothese, dass sich zwischen den Atomen leerer Raum befindet, in Verbindung gebracht. Dabei erklärte er, dass Atome unveränderlich sind sowie eine bestimmte Masse und Größe in Kugelform besitzen. Er nahm an, dass die Atome eines chemischen Elements identisch sind und sich lediglich bezüglich der Größe und Masse von denen anderer Elemente abgrenzen. Zudem bleiben Atome, laut Dalton, nach chemischer Reaktion erhalten und setzen sich aus konkreten einfachen Zahlenverhältnissen zu Verbindungen zusammen (Barke, 2006; Schmidt, 2010). Entsprechend zeigt sich, dass er begrifflich kleinste Teilchen und Atome synonym verwendete und die Diversität der Teilchen (-verbände) vernachlässigte (vgl. Barke, 2006). Es folgten Analysen, die zur Unterscheidung zwischen Atom und Molekül (nach Kekulé, 1861) und schließlich zu Modellvorstellungen über Ionen, gemäß der Dissoziationstheorie nach Arrhenius (1884), führten. Bis

zur Differenzierung des Atommodells Ende des 19. Jahrhunderts wurde die Daltonsche Modellvorstellung angenommen. Die darauffolgenden Entwicklungen des Atommodells, ausgehend von Thomson (ca. 1904) über Rutherford (ca. 1911) und Bohr (ca. 1913) bis hin zum Orbitalmodell (ca. 1928) lassen uns wissen, dass sich der Teilchenbegriff nicht nur auf Atome, sondern auch auf Moleküle, Ionen, Radikale usw. bezieht (Barke, 2006; Schmidt, 2010). Die Auffassung des diskontinuierlichen Aufbaus von Materie teilen wir auch heute noch und korrigieren Daltons Teilchenbegriff um die Vielzahl der Partikel als Sammelbegriff, vor allem in Abgrenzung zu Elementen (vgl. ISB, 2023c). Als das einfachste Modell zum Aufbau von Materie wird daher heute angenommen, dass sich Stoffe bzw. Körper aus unvorstellbar vielen kleinsten Teilchen in beliebiger Gestalt (Form, Masse, Größe) zusammensetzen (vgl. Eilks, 2007; Schreiber, 2013; ISB, 2023c). Folglich lässt sich ableiten:

Stoffe sind aus kleinsten Teilchen wie Molekülen, Ionen, Atomen usw. in beliebiger Anordnung aufgebaut, wobei sich zwischen ihnen leerer Raum (Diskontinuum) befindet (vgl. Barke, 2006; Johannesmeyer, 2004; Schreiber, 2013; ZPG Chemie, 2016).

2.1 Denken in den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000)

Johnstone (1993) untersuchte, wie sich die Natur der Chemie zusammensetzen und beschreiben lässt. Beobachtungen eines Stoffes, samt seinen Eigenschaften und Verhaltensweisen, können repräsentativ veranschaulicht werden und damit einen chemischen Sachverhalt erklären. Dabei bedient sich der Chemiker Atomen, Ionen, Molekülen und weiteren subatomaren Teilchen, die er zur Erklärung von Materie nutzt (Reid, 2021). Johnstone (1993) nutzt zur Erklärung der Chemie ein Drei-Ebenen-Modell (s. Abbildung 2), indem er zwischen der makroskopischen, submikroskopischen und repräsentativen Ebene differenziert (Barke, 2006; Chandrasegaran et al., 2007; Chittleborough & Treagust, 2007; Haas & Marohn, 2022; Parchmann et al., 2010; Talanquer, 2011; Treagust et al., 2003):

- I. Die *Makroskopische Ebene* (Stoffebene) beschreibt reale, beobachtbare und messbare Phänomene der stofflichen Welt. Sie kann von dem Lernenden (ggf. mit Hilfsmitteln) sinnlich wahrgenommen werden.
- II. Die *Submikroskopische Ebene* (Teilchenebene) fokussiert Teilchen wie Atome, Ionen oder Moleküle und chemische Prozesse als Teilchenbewegungen, die mittels Modellen zum Aufbau der Materie oder dem Energiekonzept auf Teilchenebene veranschaulicht werden können.
- III. Die *Repräsentative Ebene* beinhaltet alle Repräsentationen wie Formeln, Textformen, Gleichungen, Zeichnungen, Diagramme, Bilder oder mathematische Zusammenhänge, um die Materie in ihrer Beschaffenheit makroskopisch oder/und submikroskopisch zu visualisieren.

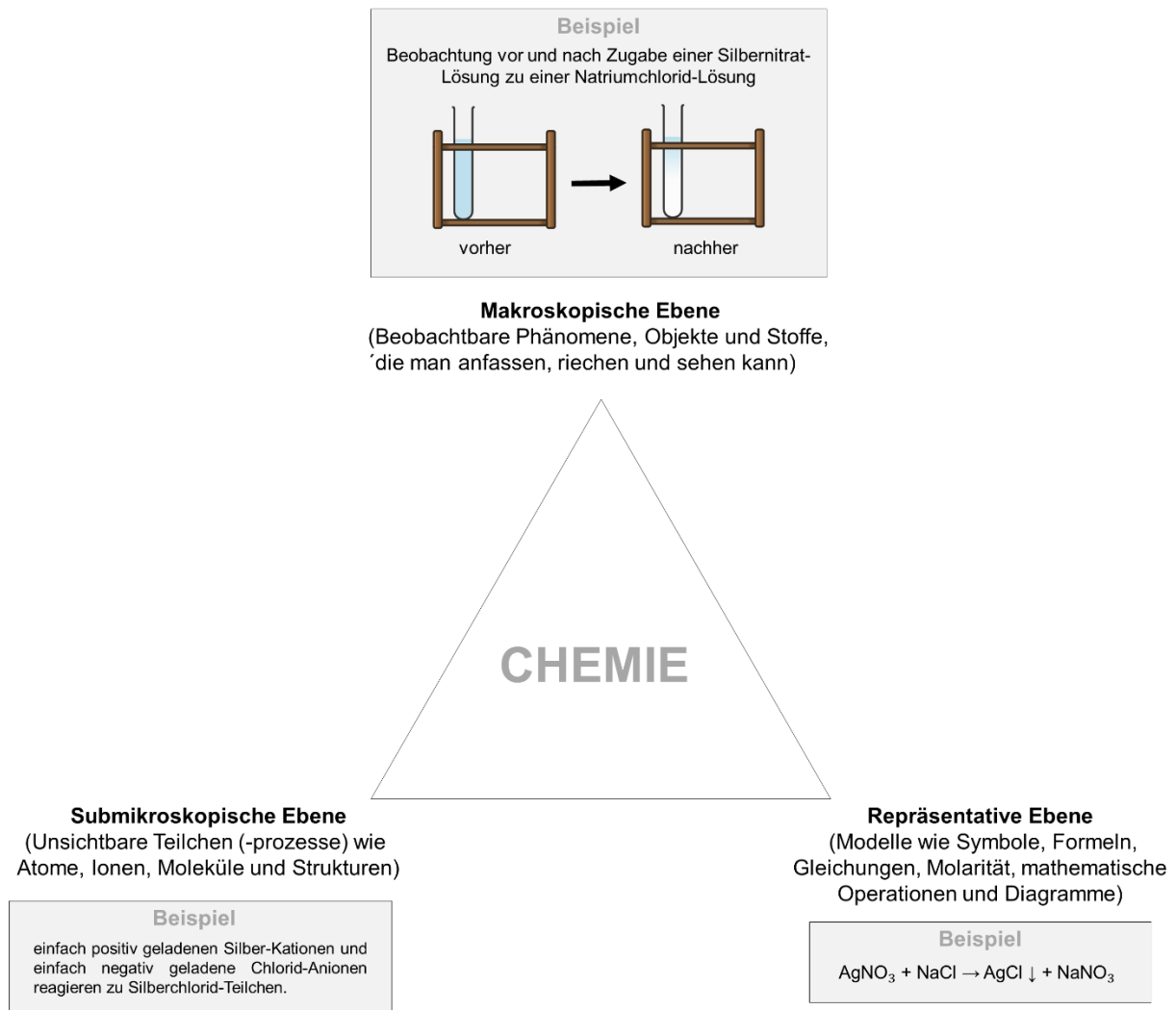


Abbildung 2. Johnstone's Dreieck (angepasst an Johnstone, 1993, 2000; orientiert an Parchmann et al., 2010).

Der makroskopischen Ebene ist man durch Beobachtungen und ihren realen Erfahrungen im Alltag sehr nah (z.B. Beobachtung eines weißen Niederschlags beim Experimentieren; vgl. Abbildung 2). Um chemische Konzepte zu verstehen, bedarf es jedoch eines Wechsels auf die submikroskopische Ebene. Es schließen sich Überlegungen, Erklärungsansätze und Erläuterungen in Bezug auf das Unsichtbare und Molekulare an, um die Stoffebene zu interpretieren (z.B. Wechsel von Stoff- auf Teilchenebene: Wird eine Natriumchlorid-Lösung mit einer Silbernitrat-Lösung versetzt, reagieren auf Teilchenebene die einfach positiv geladenen Silber-Kationen mit den einfach negativ geladenen Chlorid-Anionen zu Silberchlorid-Teilchen; vgl. Abbildung 2) und mittels repräsentativer Ebene (s.u. Kapitel 3.1) zu veranschaulichen (z.B. Symbolschreibweise: $\text{AgNO}_3 + \text{NaCl} \rightarrow \text{AgCl} \downarrow + \text{NaNO}_3$ vgl. Abbildung 2). Demnach können makroskopische Phänomene mithilfe modellhafter Vorstellungen auf submikroskopischer Ebene in Form von geeigneten Repräsentationsformen erklärt werden. In einer Triplet-Beziehung ergänzen sich die drei Ebenen und wechseln ineinander, wobei keine der anderen überlegen ist (Johnstone, 1993, 2000; Pfeifer et al., 2002). Erfahrene Chemiker können, gemäß

Johnstone (2000) sowie Kozma und Russell (1997), alle drei Ebenen gezielt gleichzeitig verwenden und diese bewusst ineinander überführen. Der Wechsel zwischen der Stoff- und Teilchenebene unter Berücksichtigung von chemischen Darstellungsformen, ist damit unabdingbar für ein elaboriertes Verständnis chemischer Konzepte und dem erfolgreichen Lernen im Fach Chemie (Johnstone, 1993; Eilks, 2012; Kelly et al., 2010; Schnitker, 2016).

In den naturwissenschaftsdidaktischen Forschungen wird seit Jahren auf Grundlage des Dreiecks von Johnstone (1993, 2000) das Lehren und Lernen in den Naturwissenschaften, insbesondere in der Chemie, untersucht (Devetak et al., 2004; Mahaffy, 2006; Petillion & McNeil, 2020; Reid, 2021; Talanquer, 2011). Studien setzen sich mit der chemischen Fachsprache (Fleischer, 2018; Haas & Marohn, 2022), den Struktur-Eigenschafts-Beziehungen (Steffensky et al., 2005), Schülervorstellungen (Petermann et al., 2008; Schmidt, 2010) und diversen analogen und digitalen Lernszenarien für den lernwirksamen Chemieunterricht (Petillion & McNeil, 2020; Schnitker, 2016; Tasker & Dalton, 2006) auseinander, indem sie sich auf den Annahmen von Johnstone (1993, 2000) stützen und diese erweitern sowie aktualisieren. Dabei zielen sie darauf ab, die Ebenen im Fachunterricht für die Wissensvermittlung zu nutzen (vgl. Jaber & BouJaoude, 2012; Wu et al., 2001), die Fachsprache per se zu fördern (z.B. Projekte wie „ChemLEVEL – Fachsprache fördern auf Basis des Johnstone-Dreiecks“ nach Haas & Marohn, 2022) und das naturwissenschaftliche Verständnis zu ergründen (vgl. Keiner & Graulich, 2020; Reid, 2021). Doch auch wenn das Drei-Ebenen-Modell weitverbreitet sehr viel Anklang in den Naturwissenschaftsdidaktiken findet und sich sehr nützlich zur Analyse des chemischen Wissens zeigt, sollten die Ansätze von Johnstone (1993, 2000) aus kognitionspsychologischer Sicht kritisch reflektiert werden (vgl. Reid, 2021). Talanquer (2011) ermutigt zur Diskussion der tatsächlichen Bedeutung einer jeden Dreiecksecke (vgl. Reid, 2021). Er sieht als Hauptproblem an, dass ein junger Lerner mit begrenzten kognitiven Kapazitäten nicht auf allen drei Ebenen gleichzeitig arbeiten kann (Talanquer, 2011; Reid, 2021). Die Triplet-Beziehung in das Langzeitgedächtnis zu integrieren kann sehr herausfordernd sein (Gabel, 1998; vgl. Kapitel 2.2). Der Reichtum chemischen Wissens kann durch das bloße Übersetzen zwischen den Ebenen nicht erfasst werden. Schließlich beruht das chemische Grundverständnis auf tiefgründigeren Elaborationsprozessen (Talanquer, 2011). Folglich sollten die drei Ebenen des Dreiecks nicht disjunkt mit bloßen Translationen von der Stoff- in die Teilchenebene und dem Ziel der Zusammenfassung auf repräsentativer Ebene betrachtet werden (vgl. Talanquer, 2000). Zwar ist die Trennung zwischen den Repräsentationen und der makroskopischen bzw. submikroskopischen Ebene möglich, wird in der Fachdidaktik aber immer wieder diskutiert (Fleischer, 2018; Talanquer, 2011). In der Literatur werden häufig alle drei Ecken als Repräsentationsebenen betrachtet (Justi & Gilbert, 2002a). Die Stoffebene wird nicht nur in Beziehung zu Alltagsphänomenen gesetzt (Treagust et al., 2003), ihr wird auch ein repräsentativer

Charakter zugewiesen, der sich auf Konzepte und Ideen zur Beschreibung der stofflichen Eigenschaften wie pH-Wert oder Temperatur bezieht (Gilbert & Treagust, 2009). Vor allem submikroskopische Darstellungen können bildlichen oder symbolischen Repräsentationen gleichen (Hoffmann & Laszlo, 1991; Taber, 2013; Talanquer, 2011). Den Repräsentationsformen wird damit sowohl ein beschreibendes als auch erklärendes Potential zugeschrieben (nach Fleischer, 2018). Entsprechend scheint es, dass sich die Ebenen nicht durchweg eindeutig voneinander abgrenzen lassen und die repräsentative Ebene nicht ausschließlich als Zeichensystem angesehen werden kann (vgl. Talanquer, 2011). Das chemische Wissen obliegt folglich einer komplexeren Struktur als es in der Triplet-Beziehung von Johnstone (2000) widergespiegelt wird.

Obwohl das Drei-Ebenen-Modell von Johnstone (1993, 2000) nur begrenzt erklärungsmächtig ist, wird in der vorliegenden Forschungsarbeit grundsätzlich an dem Ansatz festgehalten. Wo hingegen die Differenzierung zwischen makroskopischer und submikroskopischer Ebene selbsterklärend ist (vgl. Taber, 2013), zeigt sich die Abgrenzung zur repräsentativen Ebene nicht trennscharf (vgl. Hoffmann & Laszlo, 1991; Taber, 2013; Talanquer, 2011). Die Autorin teilt die Auffassung vieler Fachdidaktiker (Hoffmann & Laszlo, 1991; Fleischer, 2018; Taber, 2013; Talanquer, 2011), dass die repräsentative Ebene eine beschreibende und erklärende Kraft besitzt, betrachtet die Ebene aber entgegen dieser Meinungen dennoch gesondert. Ein Grund hierfür stellt der bewusste Vollzug des Wechsels von Stoff- auf Teilchenebene dar, welcher als Voraussetzung für das simultane Operieren in allen drei Ebenen angesehen werden kann (Kozma & Russell, 1997). Als Kennzeichen eines hohen Grades an Expertise müssen beim Wissensaufbau im Fach Chemie die verschiedenen Repräsentationen mit den theoretischen Konstrukten bzw. Modellen korrekt verknüpft werden (Talanquer, 2011). Demnach hängt der adäquate Umgang mit den Darstellungsformen auf repräsentativer Ebene von der angemessenen Handhabung der Modelle ab (vgl. Kapitel 1). Dabei sollte bedacht werden, dass die vom Menschen sinnlich wahrgenommene Welt, unterschiedliche Interpretationen und damit Modellvorstellungen nach sich ziehen kann (Johnstone, 1993; Reid, 2021; Talanquer, 2011). Demnach können submikroskopische Strukturen beim Lernen chemischer Zusammenhänge und Konzepte in mentale Modelle überführt werden (vgl. Kapitel 3.3; Johnstone, 1982; Bodner & Domin, 2000; Jaber & BouJaoude, 2012). Bei der Externalisierung dieser Gedankenkonstrukte bedarf es sodann externer Repräsentationsformen, wodurch sich die Wichtigkeit der repräsentativen Ebene erklären lässt (Jaber & BouJaoude, 2012; Kozma & Russell, 1997, 2005; Reid, 2021). Ferner zielen die Untersuchungen in diesem Dissertationsprojekt sehr stark auf den Umgang mit der chemischen Fachsprache (s.u. Kapitel 3) ab. Es sollte zwar die Interpretation von chemischen Repräsentationsformen (z.B. Strukturformel) in Beziehung zu den beiden anderen Ebenen erfolgen, da der semantische Sinngehalt nach Schnotz (2001) und Mayer (2002) im Zentrum der kognitiven Modellierungsprozesse steht (vgl. Kapitel 3.3).

Jedoch ist nicht auszuschließen, dass sich vor allem unerfahrene Lernende, d.h. Novizen, auch singulär auf den formalen Umgang mit Zeichensystemen und ihren Zusammensetzungen konzentrieren. Dabei kann es sich um das Kennenlernen der Stöchiometrie, das regelgeleitete Formulieren von chemischen Reaktionsgleichungen oder das Auswendiglernen von Formeln handeln. Ein Beispiel hierfür wäre der Koeffizientenausgleich beim Aufstellen einer Reaktionsgleichung, der das mathematische Vorgehen wie das Suchen des kleinsten gemeinsamen Vielfachen (Repräsentative Ebene) fokussiert und die Bedeutung der Teilchenanzahl (Teilchenebene) in Hinblick auf die Stoffportion (Stoffebene) vernachlässigt. Zugegebenermaßen wird damit die eigentliche Funktion von chemischen Repräsentationen als Modelle (vgl. Kapitel 1.1) verfehlt, da beispielsweise der fundamentale Bezug zum Original in Form eines realen Phänomens missachtet wird. Dennoch ist es durchaus denkbar, dass sich der Lernende, im Widerspruch zu Schnotz (2001) oder Mayer (2002), bei der Verwendung chemischer Darstellungsformen vorerst einzig auf repräsentativer Ebene bewegt. Mit der chemischen Fachsprache geht ein hoher Grad an Komplexität einher (s.u. Kapitel 3.4). Aus fachdidaktischer Perspektive wird bereits dem alleinigen Umgang mit der Vielzahl an chemischen Repräsentationsformen (vgl. Representational Competence nach Kozma & Russell, 2005 in Kapitel 3.2) ein hoher Stellenwert zugesprochen. Exemplarisch wird das repetitive Training zum Erlernen von Säurenamen, ihren Summenformeln und ihren Säurerest-Ionen (z.B. Salpetersäure, HNO_3 , Nitrat-Ion) auf Grundlage formaler Wechsel zwischen diesen Darstellungen angeführt (vgl. Abbildung 3). Dieses Beispiel wirkt auf den ersten Blick unvollständig, wenn man bedenkt, dass der Bezug zu Stoff- und Teilchenebene außen vorgelassen wurde. Betrachtet man aber das Elaborieren auf repräsentativer Ebene als Ausgangslage für die Initiierung (möglicher) weiterer Denkprozesse, so könnte sich nicht nur die Existenz der zusätzlichen Ebene, sondern auch ihr Nutzen für das effiziente Lernen im Fach Chemie erklären lassen (vgl. Johnstone, 1982, 1993, 2000, 2009; Kozma & Russell, 1997). Wurden die Lernprozesse auf repräsentativer Ebene erfolgreich abgeschlossen, ist nicht auszuschließen, dass eine Verbindung zur makroskopischen und submikroskopischen Ebene hergestellt wird. Auf Basis bereits erlernter Inhalte wie der Summenformel und ihres Nitrat-Ions könnten dann beispielsweise weiterführende Beziehungen zur Dissoziation in Wasser oder zur Zersetzung an der Luft hergestellt werden (vgl. Abbildung 3; Johnstone, 1993, 2000). Abbildung 3 zeigt auf, dass sich das neu-konstruierte Wissen zu den Darstellungsformen (z.B. Repräsentationswechsel und –verknüpfungen am Beispiel *Salpetersäure*), auf Basis der repräsentativen Ebene, sukzessive mit den beiden anderen Ebenen verstetigt, wodurch ein Denken in den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) eingeleitet wird. Dies spricht aus Sichtweise der Fachdidaktik für die Daseinsberechtigung aller drei Ebenen in einem Modell und demonstriert wie vielversprechend das Drei-Ebenen-Modell nach Johnstone (1993, 2000) für das Lernen im Fach Chemie sein kann (Mahaffy, 2006; Santos & Arroio, 2016).

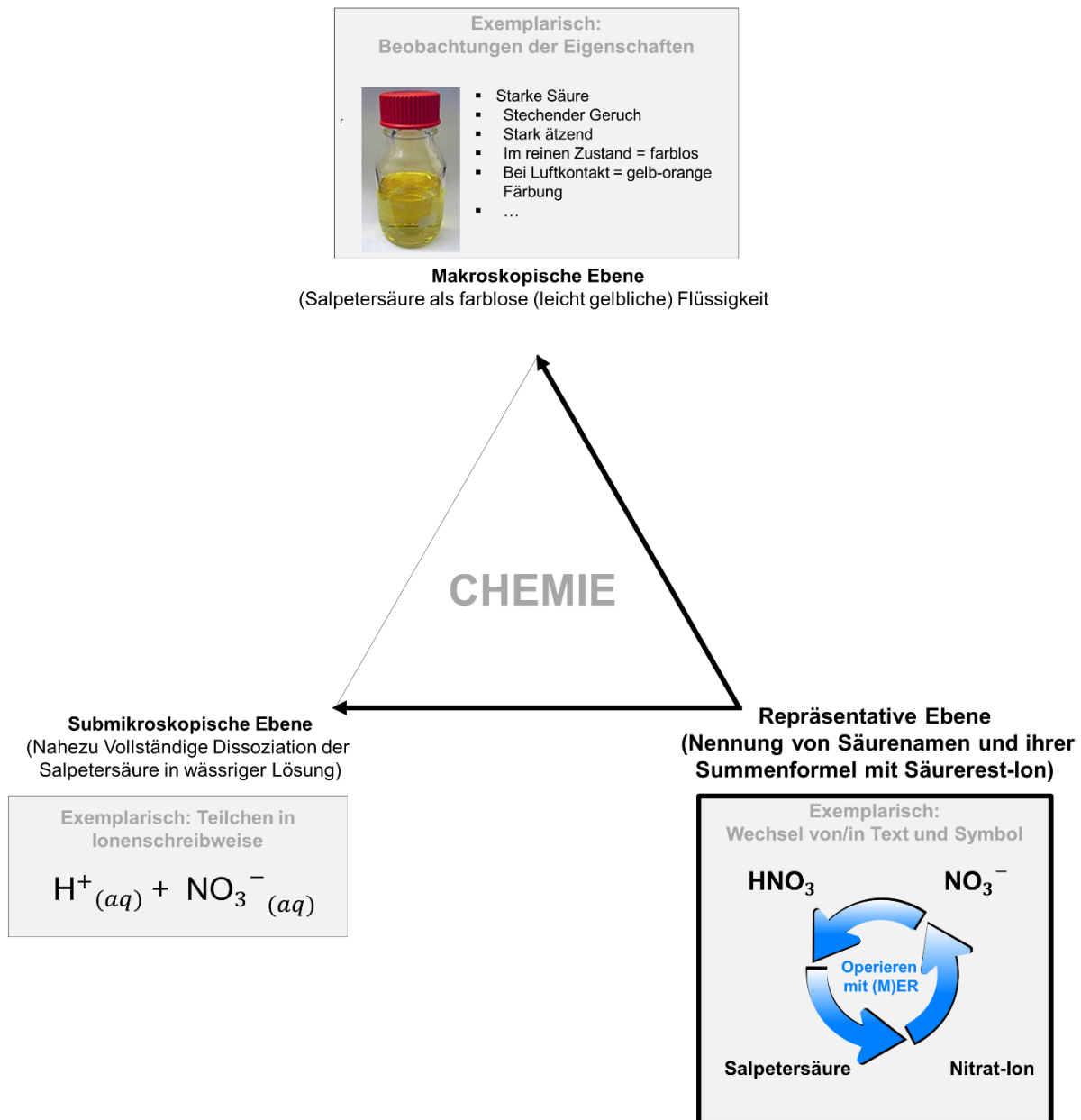


Abbildung 3. Denken in den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) auf Grundlage des Operierens mit der repräsentativen Ebene; exemplarisch für Salpetersäure.

Es wurde sich daher gegen die Einordnung der repräsentativen Ebene *in* die submikroskopische oder/und makroskopische Ebene im Sinne eines Zwei-Ebenen-Modells entschieden (vgl. Fleischer, 2018; Hoffmann & Laszlo, 1991; Gilbert & Treagust, 2009). Die Autorin dieser Arbeit ist der Meinung, dass die repräsentative Ebene für den kumulativen Wissensaufbau im Fach Chemie mit der beobachtbaren Stoffebene und/oder den visuellen sowie mentalen Modellen der Teilchenebene wechselwirkt. Zwar sollten Repräsentationen für ein umfangreiches, chemisches Grundverständnis stets einen semantischen Sinngehalt besitzen, jedoch muss dieser nicht immer von Anfang an ersichtlich sein. Entsprechend sollte die bewusste Konzentrierung auf die repräsentative Ebene nicht unberücksichtigt bleiben. Bereits das Operieren auf reprä-

sentativer Ebene kann sehr herausfordernd sein (z.B. Auswendiglernen des Periodensystems). Entsprechend müssen Beziehungen *zwischen* der repräsentativen Ebene und der Stoff- bzw. Teilchenebene geschaffen werden.

„Undoubtedly, the triplet relationship is a very powerful, productive, and widely used metaphor for both teaching and doing educational research in chemistry, as well as in science in general.“

(Talanquer, 2011; S. 192)

In Anlehnung an Johnstone (2000) stützt sich die vorliegende Arbeit auf dem Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis und folglich auf den Stärken einer jeden Ebene. Pointiert werden die Zusammenhänge der Repräsentationen auf Stoff- und Teilchenebene durch das Beziehungsgefüge zwischen den drei Ebenen, d.h. Wechsel zwischen Stoff- und Teilchenebene oder zwischen Stoff- bzw. Teilchenebene und der repräsentativen Ebene. Es wird daher konkludiert:

Die Fähigkeit, jede der drei Ebenen zu verstehen, miteinander zu verknüpfen und in die jeweils anderen Ebenen zu transferieren, wird als Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis verstanden (vgl. Farida et al., 2010; Johnstone, 1993, 2000, 2009).

2.1.1 Bedeutung und Relevanz des Denkens in den drei Ebenen für das Unterrichtsfach Chemie

Die Bildungsstandards im Fach Chemie für den Mittleren Schulabschluss (2005)³ in Bayern veranschaulichen die zentrale Funktion, die das Denken in den Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) im Unterrichtsfach Chemie einnimmt. Dabei zeigt sich in allen vier Kompetenzbereichen *Fachwissen, Erkenntnisgewinnung, Kommunikation* und *Bewertung* die Wechselwirkung zwischen submikroskopischer, makroskopischer und repräsentativer Ebene (vgl. Tabelle 1). Fest verankert in den Bildungszielen offenbart sich der Umgang mit der Stoff-, Teilchen- und repräsentativen Ebene, wobei chemische Modelle eine wichtige Funktion einnehmen. Entsprechend listet Tabelle 1 exemplarisch für jeden Kompetenzbereich einen Textausschnitt für das Denken in den drei Ebenen (vgl. blaue Markierung) aus den Bildungsstandards auf (KMK, 2005) und verdeutlicht den Zusammenhang zwischen dem Dreieck von Johnstone (1993, 2000) und den fach- sowie prozessbezogenen Fähigkeiten bzw. Fertigkeiten, die die Schüler erwerben sollen.

Fachwissen. Um die chemischen Phänomene, die dem Kompetenzbereich zugrunde liegen, strukturieren zu können, hat die KMK (2005) vier Basiskonzepte ins Leben gerufen. Sie beschreiben neben Struktur-Eigenschafts-Beziehungen, chemischen Reaktionen und der ener-

³ sowie für die Allgemeine Hochschulreife (2020)

getischen Betrachtung bei Stoffumwandlungen auch explizit Stoff-Teilchen-Beziehungen. Entsprechend sollten Schüler bedeutsame Stoffe mit ihren Eigenschaften beschreiben und benennen können. Ferner wird erwartet, dass sie Modelle für den submikroskopischen Bau der Stoffe sowie geeignete Atommodelle für den Bau von Atomen wählen und verwenden können. Bindungsmodelle sollen zur Erklärung von Teilchenaggregationen, räumlichen Strukturen sowie inter- und intramolekularen Wechselwirkungen genutzt werden. Überdies müssen die Lernenden in der Lage sein, die Vielfalt der Stoffe mittels verschiedener Teilchenkombinationen und -anordnungen erklären zu können. Der Kompetenzbereich *Fachwissen* betont daher die Aufgabe der Teilchenebene die Stoffebene zu erklären und dabei explizit auf Modelle zurückzugreifen (vgl. blaue Markierung in Tabelle 1). Dabei forciert das Stoff-Teilchen-Konzept eine durchgängig konsequente Unterscheidung zwischen erfahrbaren Phänomenen der stofflichen Welt und deren Deutung auf Teilchenebene. Deutlich spiegelt sich bei der Zusammenstellung der fachinhaltlichen Anforderungen der KMK (2005) das Beziehungsgefüge zwischen Stoff- und Teilchenebene sowie den Modellen auf repräsentativer Ebene und damit das Denken in den drei Ebenen wider (vgl. Hoffmann & Laszlo, 1991; Johnstone, 1993, 2000). Der Bezug zwischen Stoff- und Teilchenebene wird als Konzept angesehen, mit welchem systematisches Fachwissen aufgebaut und obendrein ein Transfer in andere naturwissenschaftliche Unterrichtsfächer ermöglicht werden soll (KMK, 2005).

Erkenntnisgewinnung. Im Vergleich zum Fachwissen konzentriert sich die Erkenntnisgewinnung stärker auf das naturwissenschaftliche Arbeiten. Dabei verdeutlicht der Textausschnitt in Tabelle 1, dass kognitive Modellierungsprozesse durch den gezielten Rückgriff auf mentale Schemata des Langzeitgedächtnisses (vgl. Schnotz, 2001; s. auch Kapitel 3.3) initiiert werden können, um stoffliche Beobachtungen, beispielsweise während des Experimentierens, zu erfassen und zu erläutern.

Kommunikation. Der Kompetenzbereich *Kommunikation* ist eng verknüpft mit dem der chemischen Fachsprache. Entsprechend wird die wichtige Stellung des Umgangs mit den verschiedenen Darstellungsformen der Chemie, welche von der KMK (2005) in verbal, symbolisch und mathematisch geteilt wurden, aufgezeigt. Dabei wird die repräsentative Ebene als unerlässliches Werkzeug zur Veranschaulichung und Erklärung der stofflichen Welt hervorgehoben.

Bewertung. Schließlich bringt der vierte Kompetenzbereich *Bewertung* den Alltagsbezug in besonderem Maße zum Vorschein und gewichtet die Stoffebene im Zusammenhang mit dem menschlichen Handeln (Mahaffy, 2006), welches zum kritischen Denken und Reflektieren anregen sollte. Obgleich dieser Kompetenzbereich nicht explizit Teilchen, Modelle oder Repräsentationen nennt, wird dennoch ersichtlich, dass ohne deren Einschluss in den Denkprozess ein adäquater Diskurs über gesellschaftsrelevante Themen nicht möglich ist.

Tabelle 1. Veranschaulichung des Denkens in den drei Ebenen nach Johnstone (1993) in den Bildungsstandards anhand exemplarischer Textausschnitte (nach KMK, 2005).

Kompetenzbereich	Exemplarischer Ausschnitt für das Denken in den Ebenen aus den Bildungsstandards (nach KMK, 2005)
Fachwissen	„Die Chemie betrachtet <i>Stoffe</i> , deren Eigenschaften, Umwandlungen sowie Nutzungsmöglichkeiten phänomenologisch (sind) und zieht zu deren <i>Erklärung Modelle auf der Teilchenebene heran</i> .“
Erkenntnisgewinnung	„Die <i>Verknüpfung gewonnener Erkenntnisse mit bereits geläufigen Konzepten, Modellen und Theorien</i> führt zur <i>Fähigkeit, chemische Phänomene zu erkennen und zu erklären</i> .“
Kommunikation	„Die <i>Kommunikation</i> ist für die Lernenden ein notwendiges Werkzeug, um für <i>Phänomene Erklärungen</i> zu entwickeln, diese in <i>geeigneter Form darzustellen (verbal, symbolisch, mathematisch) und mitzuteilen</i> .“
Bewertung	„ <i>Schüler (sollten) in der Lage sein, chemische Sachverhalte in ihrer Bedeutung und Anwendung aufzuzeigen, [...] Probleme in realen Situationen zu erfassen, [...] mögliche Lösungen zu erwägen sowie deren Konsequenzen zu diskutieren</i> .“

Die Rolle des Denkens in den Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) wird sehr verständlich von der KMK (2005) akzentuiert und demonstriert eindeutig die Wichtigkeit eines umfangreichen Stoff-Teilchen-Konzeptverständnisses für das Unterrichtsfach Chemie. Der Chemieunterricht macht sich zur Aufgabe die Relevanz chemischer Erkenntnisse für die heutige Lebenswelt transparent zu machen (vgl. ISB, 2023c; KMK, 2005; Schmidt, 2010). Analog zur Fachwissenschaft werden daher auch im Fachunterricht zahlreiche Repräsentationen zur Veranschaulichung der Stoff- und Teilchenebene gewählt, denen als Modelle eine herausragende Rolle im Unterricht zugesprochen wird (Kozma & Russell, 2005).

2.1.2 Das Teilchenmodell im Chemieunterricht

Im Chemieunterricht werden häufig realistische Bild (z.B. Fotografie) zur Darstellung eines beobachtbaren Phänomens der Stoffebene (z.B. Kohlenstoffmodifikationen: Diamant vs. Graphit) gewählt. Hingegen können beispielsweise Strukturmodelle den strukturellen Aufbau eines Stoffes (z.B. Kristallstruktur: ABAB-Graphit- vs. Diamantgitter) submikroskopisch erklären. Entsprechend wird das verzahnte Gefüge von Stoff- und Modellwelt der Teilchen ersichtlich. Zur Entwicklung eines chemischen Verständnisses bei Lernenden kommt dem Teilchenmodell, z.B. in Form von Struktur-, Bindungs- oder Atommodellen zum Aufbau der Materie, eine außerordentlich große Bedeutung zu (Pfeifer et al., 2006; Talanquer, 2011; Eilks et al., 2012;

Santos & Arroio, 2016). Dabei deckt die Genese des Teilchenbegriffs, welcher ursprünglich nach Dalton mit dem Atombegriff gleichgesetzt wurde (s.o. einleitender Abschnitt von Kapitel 2), den Zusammenhang zwischen Atom- und Teilchenmodell auf. Im Laufe der Schuljahre wird das Teilchenmodell differenzierter und anspruchsvoller in den Chemieunterricht eingebunden, indem abstraktere und komplexere Modellierungen initiiert werden, die eine stetig in sich wachsende Wissensstruktur bewirken sollen (Häußler et al., 2015). Charakteristisch für das Teilchenmodell im Chemieunterricht ist, dass die kleinsten Teilchen ...

- I. eines Reinstoffes identisch sind und sich bezüglich ihrer Größe und Masse von den Teilchen anderer Stoffe abgrenzen.
- II. in ständiger, ungeordneter Bewegung sind und sehr oft aneinanderstoßen.
- III. sich untereinander anziehen.

(Schreiber, 2013)

Wird ein Blick in den LehrplanPLUS für das neunstufige Gymnasium in Bayern geworfen, so wird die Wichtigkeit des Teilchenmodells bereits im Chemieanfangsunterricht ersichtlich. Schüler sollten in Jahrgangsstufe 8 des naturwissenschaftlich-technologischen Gymnasiums (NTG) die Kompetenz erlangen, das Teilchenmodell für Erklärungen von Stoffeigenschaften und physikalischen Vorgängen adäquat zu nutzen (ISB, 2023a). In der 8. Klasse ist es die Einführung des Teilchenmodells, auf dessen Grundlage die Atommodelle von Dalton bis hin zu Rutherford und seinem Kern-Hülle-Modell thematisiert werden, um in Jahrgangsstufe 9 zum Energiestufenmodell überleiten zu können (ISB, 2023a). In Jahrgangsstufe 10 erhöht sich der Abstraktionsgrad dahingehend (vgl. ISB, 2023a), dass nicht mehr länger nur materielle Bindungs- und Wechselwirkungsmodelle auf Teilchenebene thematisiert werden, der Lehrplan erwartet nun eine explizite Konzentrierung auf ideelle Modelle (z.B. Modellvorstellung zu Enzymreaktionen und deren Hemmung). Ferner sollen 3D-Modelle (z.B. Chirale Moleküle wie Monosaccharid) sowie Computersimulationen bzw. Modellierungssoftwareprogramme genutzt werden (ISB, 2023a, 2023c; KMK, 2005). Aus fach- und mediendidaktischer Sicht steigt das Niveau ausgehend vom Chemieanfangsunterricht bis zum Abschluss der Allgemeinen Hochschulreife stetig an, da von den Schülern hinsichtlich der wissenschaftlichen Theorien (z.B. Orbital- oder Hybridisierungsmodelle) und der Teilchenmodellierung zur Veranschaulichung von intra- und intermolekularen Wechselwirkungen (KMK, 2020) ein hohes Maß an Modellierungskompetenz verlangt wird. Die Themen verlagern sich von Aggregatzuständen, Zustandsänderungen oder Lösungsvorgängen in der Unterstufe, über Unterschiede zwischen Reinstoff und Stoffgemisch oder Diffusion in der Mittelstufe bis hin zur kinetischen Gastheorie in der Oberstufe (vgl. ISB, 2023a, 2023b, 2023c). Das Teilchenmodell kann durch die Vielfalt an Repräsentationen mit ihren diversen medialen Gestaltungsmöglichkeiten präsentiert werden

und mündet dabei, ausgehend von einfachen Modellvorstellungen, in komplexere ideelle Modelle auf Stoff- und Teilchenebene (vgl. ISB, 2023b). Dabei besitzt es wie jedes andere Modell auch Unzulänglichkeiten (z.B. bei statischen statt dynamischen Teilchenmodellierungen; vgl. Schmidt, 2010). Entsprechend werden im Chemieunterricht Modellgrenzen wie Größe, Gestalt oder Aussehen sowie der Teilchenaufbau thematisiert und Annahmen zum „Verschwinden“ oder „Entstehen“ sowie zur elektrischen Leitfähigkeit diskutiert (vgl. ISB, 2023b).

2.2 Schülervorstellungen zum Stoff-Teilchen-Modell und didaktische Herausforderungen

Mit der ansteigenden Komplexität der Fachwissensinhalte gehen schließlich auch herausfordernde Modellierungsprozesse und infolgedessen schwierigere Wechsel zwischen makroskopischer, submikroskopischer und repräsentativer Ebene einher (vgl. KMK, 2005, 2020; Treagust, 2011; Johnstone, 1993, 2000). Es wird deutlich, welche bedeutsame Rolle dem Denken in den Ebenen nach Johnstone (2000) im Laufe der Schullaufbahn zugesprochen werden kann und welche große Komplexität sich hinter diesem Konstrukt „Stoff-Teilchen-Konzept“ verbirgt.

2.2.1 Schüler (-fehl) -vorstellungen zum Stoff-Teilchen-Konzept

Das Drei-Ebenen-Modell von Johnstone (1993, 2000) war das Ergebnis zahlreicher Überlegungen zu den Schwierigkeiten, die das Lehren und Lernen im Fach Chemie bereitet. Entsprechend können adäquate Modellierungsprozesse nur durch eine korrekte und gleichzeitige Verwendung aller drei Ebenen initiiert werden (Johnstone, 1993, 2000; Chittleborough & Treagust, 2006; Farida et al., 2010). Laut Johnstone (1993) ist aber für junge Lernende diese simultane Verwendung der drei Ebenen nahezu unmöglich. Er stützt seine Annahmen auf den kognitiven Verarbeitungsprozessen des Individuums. Dabei stellte er fest, dass die begrenzte Kapazität des Arbeitsgedächtnisses eine zentrale Rolle spielt (vgl. Kapitel 3.3; Reid, 2021). Es sei das Problem junger Lernender, dass die Materie keine direkten Informationen liefert und das Langzeitgedächtnis, wegen des Neuheitsgrades der Information, kein nützliches oder brauchbares Vorwissen bereithält. Möchte das Arbeitsgedächtnis also auf das Langzeitgedächtnis zurückgreifen und scheitert dabei, ist der Wissensaufbau gefährdet und neue Informationen können nicht internalisiert werden (vgl. Johnstone, 1993, 2000; Taber, 2013; Reid, 2021). Dies ist vor allem dann der Fall, wenn die Informationen zu viel Platz im Arbeitsgedächtnis beanspruchen. Es bleibt sodann kaum Raum für das Verständnis übrig (vgl. Alenezi, 2008). Die Folge ist, dass die Informationen "manipuliert" werden und in ein für den Lernenden „sinnvolles aber oftmals fehlerbehaftetes“ Denkkonstrukt umgeändert werden (vgl. Talanquer, 2011). Folglich werden die drei Ebenen häufig vermischt, sodass die sinnvolle Anwendung, Konstruktion und Interpretation der Repräsentationen (s. auch Kapitel 3.2) zur Erklärung der Stoff- und Teilchenebene missglückt (Davidowitz & Chittleborough, 2009). Dies führt zu einem

mangelnden Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis und zu Vorstellungen, die fachlich nicht anschlussfähig sind und gegebenenfalls als Fehlvorstellungen einzuordnen sind (Petermann et al., 2008; Haas & Marohn, 2022).

Internationale Studien zeigen, dass die drei Ebenen im Chemieunterricht häufig unzureichend miteinander verknüpft werden (Devetak et al., 2004; Farida et al., 2010; Santos & Arroio, 2016). Entsprechend wurden zahlreiche Fehlkonzepte bezüglich des Modellierens nachgewiesen (Mikelskis-Seifert, 2002; Leisner-Bodenthin, 2006; Harrison & Treagust, 2000). Chemische Prozesse auf makroskopischer Ebene mithilfe unterschiedlicher Repräsentationen auf submikroskopischer Ebene unter gleichzeitiger Berücksichtigung aller drei Ebenen zu erläutern ist für Lernende sehr herausfordernd (Chandrasegaran et al., 2007). Einerseits wird der Teilchenbegriff inkonsistent genutzt, aufgrund mangelnder Sprachfertigkeiten fälschlich mit der makroskopischen Ebene vermischt und/oder das Original mit dem (Teilchen-) Modell gleichgesetzt (Barke, 2006; Harrison & Treagust, 2000; Rodić et al., 2018). Andererseits stellt die chemische Fachsprache per se eine Hürde dar (s. auch Kapitel 3.4). Das Herstellen von Beziehungen zwischen den Repräsentationen und ihre Übersetzung bereitet Schülern in den naturwissenschaftlichen Unterrichtsfächern große Probleme und erschwert das Operieren auf repräsentativer Ebene (Ainsworth, 2006; Beck & Nerdel, 2019). Zudem haben Novizen oftmals Schwierigkeiten, symbolische Ausdrücke als Veranschaulichung von realen Phänomenen und wissenschaftlichen Prinzipien zu betrachten (Kozma & Russell, 2005; Kelly et al. 2010; Santos & Arroio, 2016). Mit mangelndem Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis können z.B. dynamische Reaktionsabläufe wie die Wechselwirkung von Anionen und Kationen im Ionengitter und deren Lösungsvorgang durch Anlagerung von Wassermolekülen nur schwer mit geeigneter Symbolschreibweise visualisiert werden (Kelly et al. 2010). So erklärt auch Schnitker (2016), dass vermehrt nicht-belastbare Vorstellungen hinsichtlich der kinetischen Gastheorie und der molekularen Beschaffenheit von Aggregatzuständen vorliegen. Nachstehend werden zwei für die vorliegende Arbeit wichtige alternative Vorstellungen zu Stoffen und ihren Eigenschaften (nach Barke, 2006) mit ihren Präkonzepten zum Stoff-Teilchen-Konzept beleuchtet:

Verbrennungsvorstellungen gehen auf die Phlogistontheorie zurück und stützen sich darauf, dass bei Verbrennungen „etwas“ an die Luft abgegeben wird oder „verloren geht“ (z.B. *„Beim Verbrennen von Magnesiumoxid wird eine Teilchenart verbrannt und die andere bleibt als Magnesiumoxid zurück.“*). Die Präkonzepte, entwickelt durch die erfahrbare Welt, scheinen die Modellbildung der Lernenden immens zu stören. Phänomene auf Stoffebene werden falsch mit den Erklärungen auf Teilchenebene verknüpft und bewirken Fehlvorstellungen. Auch in Bezug auf das Thema *Redoxreaktionen* kommen häufig Vorstellungen zum Vorschein, die die Oxidation inkorrekt definieren und fälschlicherweise mit einer Sauerstoff- statt einer Elektronenübertragung in Verbindung bringen.

Mischungskonzepte treten in Alltag und Unterricht durch inadäquate Vermischung von Stoff- und Teilchenebene auf (Barke, 2006; Haas & Marohn, 2022). Entsprechend werden die drei Ebenen nach Johnstone (1993) insgesamt unangemessen verknüpft, inadäquate Wechsel durchgeführt und Beziehungen unzureichend hergestellt. Mischkonzepte können sich auf Stoffumwandlungen mit falschen Interpretationen der Stoffzusammensetzung beziehen (z.B. „*Magnesiumchlorid besteht aus Magnesium und Chlor*“; korrekt wäre: „*Magnesiumchlorid setzt sich aus Magnesium-Kationen und Oxid-Anionen zusammen*“). Ferner wird das Teilchenkonzept inkonsistent verwendet (z.B. „*Zucker-Teilchen existieren im Kandiskristall, aber nicht in der Zuckerlösung*.“). Entsprechend unterscheiden Schüler zwischen vorgebildeten Teilchen, die entstehen und verschwinden können, und vorgebildeten Teilchen, die permanent existieren (Pfundt, 1981). Überdies werden die kleinsten Teilchen sehr oft als Stoffportion angesehen (z.B. „*Kupfer-Teilchen sind rot*“). Dabei scheitert häufig die Differenzierung zwischen makroskopischer und submikroskopischer Ebene, weil die repräsentative Ebene unangemessen eingebunden wird. Lernende besitzen zwar Modellvorstellungen, jedoch können diese sprachlich von Unsicherheiten geprägt sein. Entsprechend werden die Begriffe der Teilchenebene unangemessen mit der Stoffebene kombiniert und makroskopische Merkmale auf diskontinuierliche Teilchen (und umgekehrt) übertragen (z.B. „*Chlor gibt ein Elektron ab*“). Vor allem im Zusammenhang mit Redoxreaktionen werden die Ebenen oftmals miteinander „vermischt“, da die Begrifflichkeiten „Atom“, „Molekül“ oder „Ion“ nicht bewusst voneinander abgegrenzt werden (vgl. Barke, 2006). Kleinste Teilchen werden demnach mit Oberbegriffen versehen und größtenteils voreilig mit Atomen gleichgesetzt (z.B. „*Die kleinsten Teilchen des Wassers sind H-Atome und O-Atome*“). Der Übergang des Teilchenmodells zum Atommodell im chemischen Anfangsunterricht könnte dafür verantwortlich sein (vgl. Schmidt, 2010). Sollte der Begriff jedoch zur genaueren Differenzierung von Molekülen oder dem Stoff selbst genannt werden, wird er häufig vernachlässigt. Es wird dann statt der exakten Begriffsbestimmung der Teilchen lapidar auf die Stoffportion zurückgegriffen (z.B. „*Wasser setzt sich aus Wasserstoff und Sauerstoff zusammen*.“). Dies zeigt sich auch bei der symbolischen Darstellung von Teilchen, indem größtenteils Kugeln verwendet werden (ISB, 2023c). Für Ionen oder Atome mag dies erlaubt sein (ISB, 2023c), lässt sich aber nicht auf alle beliebigen Teilchen-Arten übertragen. Zudem ist der „horror vacui“ für eine Vorstellung verantwortlich (vgl. ISB, 2023a, 2023b; Barke, 2006), die sich auf einem kontinuierlichen Aufbau von Stoffen stützt (z.B. „*Der Raum kann ja nicht einfach gar nichts enthalten*“). Für den Fall, dass der Übergang von Stoff- auf Teilchenebene glückt und der Teilchenbegriff von dem Lernenden angenommen wird, ist die Leere zwischen Teilchen dennoch ein sehr abstraktes und damit schwer verständliches Konzept (Barke, 2006; Pfundt, 1981). In diesem Kontext nehmen Schüler häufig an, dass sich Teilchen wie Ionen in einer (farblosen) Flüssigkeit wie Wasser auf Stoffebene und nicht zwischen Wassermolekülen auf submikroskopischer Ebene verteilen (vgl. ISB, 2023b).

Laut Barke (2006) ist es für Lernende höchst komplex die kleinsten Teilchen der Materie mit dem Modellbegriff zu kombinieren und adäquate Denkmodelle zu konstruieren. Schmidt (2010) greift Barkes (2006) Vorstellungen auf und differenziert im Zusammenhang mit dem Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis zwischen drei Hauptkategorien an Schülervorstellungen, die stoffliche Phänomene oder chemische Reaktionen fokussieren können. Dabei kann es sich um korrekte oder fehlerbehaftete Vorstellungen 1) zur Welt der Stoffe, 2) zu Mischkonzepten aus Aspekten der Stoff- und Teilchenebene oder 3) zum Diskontinuum und den Atomen handeln. Wohingegen Mischkonzepte größtenteils Fehlvorstellungen in sich tragen (Barke, 2006; Schmidt, 2010) finden sich in Hinblick auf das Diskontinuumskonzept mehr adäquate Vorstellungen wieder. Sie orientieren sich oftmals am korrekten Teilchenbegriff und betrachten Teilchen als Stoffbildner (vgl. Barke, 2006). Adäquate Vorstellungen über Teilchen erlangen ihre Qualität aufgrund der dezidierten Trennung zwischen Stoff- und Teilchenebene unter Berücksichtigung ihrer funktionalen Beziehung.

2.2.2 Schwierigkeiten bei der Vermittlung des Stoff-Teilchen-Konzepts

Chemielehrkräfte haben daher eine Vorbildfunktion, wenn sie neben dem Teilchenkonzept chemische Fachsprache und die damit zusammenhängenden Modellierungsprozesse vermitteln (Pfeifer et al., 2002; Farida et al., 2010; Rodić et al., 2018; Santos & Arroio, 2016). Sie stehen vor der großen Herausforderung, Lernende dabei zu unterstützen adäquat in den Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) zu denken (vgl. Santos & Arroio, 2016).

„Unfortunately, most chemistry teaching is focused on the submicro–symbolic pair of the triplet and rarely helps students to build bridges to comfortably move between the three levels.“

(Talanquer, 2011, S. 181)

Auch (angehende) Chemielehrkräfte haben bei der korrekten Verwendung von Fachsprache, dem Stoff-Teilchen-Ebenenwechsel sowie der Vermittlung beider Aspekte im Unterricht Schwierigkeiten (Crawford & Cullin, 2004; Justi & Gilbert, 2002; van Driel & Verloop, 2002). Das Denken in den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) fordert den Einsatz submikroskopischer Modelle zur Erklärung der Stoffebene durch die Lehrkraft (vgl. Treagust et al., 2003). Trotz zahlreicher Bemühungen des Lehrenden diese in den Unterricht zu implementieren wird bei den Lernenden jedoch nicht immer ein Verständnis aufgebaut. Die Ergebnisse der Studien von Treagust et al. (2003) zeigen, dass die Schüler die Rolle der Repräsentation zur Veranschaulichung von Stoff- und Teilchenebene, die die Lehrkraft einsetzt, nicht immer verstehen. In der Schulpraxis scheinen sich Lehrkräfte ständig zwischen den verschiedenen chemischen Repräsentationsformen zu bewegen und je nach Situation eine andere, am besten geeignete Darstellungsform zur Veranschaulichung der Stoff- oder Teilchenebene zu wählen. Diese Wahl wird jedoch bei den Schülern nicht näher begründet bzw. diskutiert und führt

schließlich zu Verständnisschwierigkeiten (vgl. Santos & Arroio, 2016). Die Forschungen von Al-Balushi (2012) bestätigen, dass das Denken auf Teilchenebene sehr herausfordernd für junge Lernende ist und die makroskopische Ebene nur schwer in die Submikroskopische übersetzt werden kann. Folglich ist der Übertrag eines submikroskopischen Modells zur Erklärung eines chemischen Phänomens auf ein anderes mit großen Schwierigkeiten verbunden. Als eine Ursache für das mangelnde Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis von Schülern führt Al-Balushi (2012) die unausgewogene Betonung der drei Ebenen durch die Lehrkraft an. Ferner heben Lehrkräfte, laut internationaler Literatur, in ihrer Unterrichtsgestaltung den Wechsel von Stoff- auf Teilchenebene häufig nur implizit hervor (Chandrasegaran et al., 2007) und überschätzen oftmals die Modellierungskompetenz ihrer Schüler (Harrison & Treagust, 2000). Werden die Ergebnisse von Li et al. (2014) gesichtet, so wird eine Konzentrierung der Lehrkräfte auf die Stoffebene deutlich, welche die anderen beiden Ebenen explizit in den Hintergrund stellt. Auch die Untersuchungen von Devetak et al. (2004) und Al-Balushi (2012) konstatieren, dass sich Lehrpersonen in ihrer Unterrichtskonzeption selten an dem Denken in allen drei Ebenen nach Johnstone (2000) orientieren, sondern diese unzureichend miteinander in Verbindung setzen. Dabei offenbaren ihre Forschungsergebnisse, dass Lernende, deren Lernprozess von dem Denken in den drei Ebenen geprägt ist, in den Abschlussprüfungen bessere Leistungen erreichen. Laut Devetak et al. (2004) wird die Erkenntnisgewinnung durch das Verknüpfen von submikroskopischer, makroskopischer und repräsentativer Ebene gefördert, da die Verwendung von submikroskopischen Darstellungen eine intensivere Auseinandersetzung mit den chemischen Sachverhalten ermöglicht, Missverständnisse von chemischen Konzepten verringert und kognitive Modellierungsprozesse initiiert, die maßgeblich für einen langanhaltenden kumulativen Wissensaufbau sind (vgl. Devetak et al., 2004). Das Denken in den Ebenen nach Johnstone (2000) und vor allem das Verständnis über Modelle und deren Modellierungsprozesse zeigt sich folglich auch bei Lehrkräften immer wieder problembehaftet (van Driel & Verloop, 1999, 2010).

Darüber hinaus demonstrieren auch Studien mit angehenden Lehrkräften, dass diese bei Erläuterungen zu Stoff-Teilchen-Ebenenwechseln mangelnde Sprachfertigkeiten besitzen und unzureichend zwischen den Ebenen differenzieren (Rodić et al., 2018). Häufig erachten sie den präzisen Einsatz von Fachbegriffen bei Prozessen auf Stoff- und Teilchenebene als redundant, da sie als Komplikationen für das Lehren und Lernen angesehen werden (Rodić et al., 2018). Weitere Untersuchungen zum Umgang mit der repräsentativen Ebene demonstrieren, dass die Studierenden prinzipiell nicht in der Lage sind, chemische Phänomene der Stoffebene mittels geeigneter Darstellungen auf Teilchenebene zu erklären. Angesichts dessen zeigen die aktuellen Befunde von Kapici (2023), dass angehende Chemielehrkräfte am erfolgreichsten auf der symbolischen Ebene elaborieren und die anderen Ebenen für die Erklärung

chemischer Phänomene unzureichend nutzen bzw. kaum voneinander abgrenzen. Die Ergebnisse von Farida et al. (2010) liefern erste Hinweise, dass die Probleme auf fehlerbehaftete Stoff-Teilchen-Ebenenwechsel zurückzuführen sind. Dabei haben angehende Chemielehrkräfte Schwierigkeiten, Prozesse auf Teilchenebene mithilfe symbolischer Darstellungen zu erläutern und die Wichtigkeit von Modellen und Zeichnungen auf submikroskopischer Ebene zu verstehen (Farida et al., 2010). Obwohl die Studierenden für ihre Erklärungen submikroskopische Darstellungen nutzen, scheint ihnen die Bedeutung und Relevanz dieser für das chemische Grundverständnis nicht einzuleuchten. Die Prä-Post-Untersuchung bei angehenden Grundschullehrern von (Derman & Ebenezer, 2020) deckt, trotz positiver Effekte von Repräsentationsformen zur Veranschaulichung naturwissenschaftlicher Phänomene auf das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis, Schwierigkeiten bei der Verwendung des Teilchenmodells auf. Immer wieder zeigt sich, dass insbesondere eine mangelnde chemische Fachsprache das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis negativ beeinflusst (vgl. Al-Balushi, 2012). Das Denken in den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) scheint aufgrund der Merkmale des jeweiligen (Teilchen-) Modells sowie dem verbundenen Abstraktionsgrad der verschiedenen Repräsentationen für (angehende) Chemielehrkräfte sowohl schwer lern- als auch lehrbar zu sein (van Driel & Verloop, 2002; Justi & Gilbert, 2002; Eilks et al., 2012; Santos & Arroio, 2016).

3 Die chemische Fachsprache

Das Denken in den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) ist von der Vielzahl chemischer Repräsentationsformen zur Beschreibung und Erklärung der stofflichen Welt sichtlich geprägt (Fleige et al., 2012; Häußler et al., 2015; Hoffmann & Laszlo, 1991; Dori & Kabermann, 2012; Kozma & Russell, 1997). Mit der chemischen Fachsprache wird Fachwissen zusammengetragen und ausgetauscht (Bernholt et al., 2015), sodass im Sinne der Scientific Literacy gesellschaftsrelevante Themen und allgemeingültige chemische Theorien hinterfragt, analysiert und unterrichtet werden können (Nerdel, 2017). Dabei ist die Fachsprache nicht nur durch ein umfangreiches Vokabular gekennzeichnet, Satz- und Zeichenkonstruktionen sowie der sprachliche Stil untermauern ihre Mannigfaltigkeit (Rincke, 2010; Pfeifer et al., 2002). Chemiker nutzen folglich das Medium Sprache um ihr Wissen über chemische Fachinhalte zu kommunizieren, wobei Fachwissenschaftler die Fachsprache, mittels bestimmter Abmachungen, normieren (Nerdel, 2017). Die Literatur verweist aber darauf, dass keine einheitliche Begriffsbestimmung der Fachsprache vorliegt (Benes, 1971; Rincke, 2010). In der Chemiedidaktik wird zwischen drei kommunikativen Ebenen unterschieden: Die Wissenschafts-, Unterrichts- und Alltagssprache (Pfeifer et al., 2002; vgl. Abbildung 4).

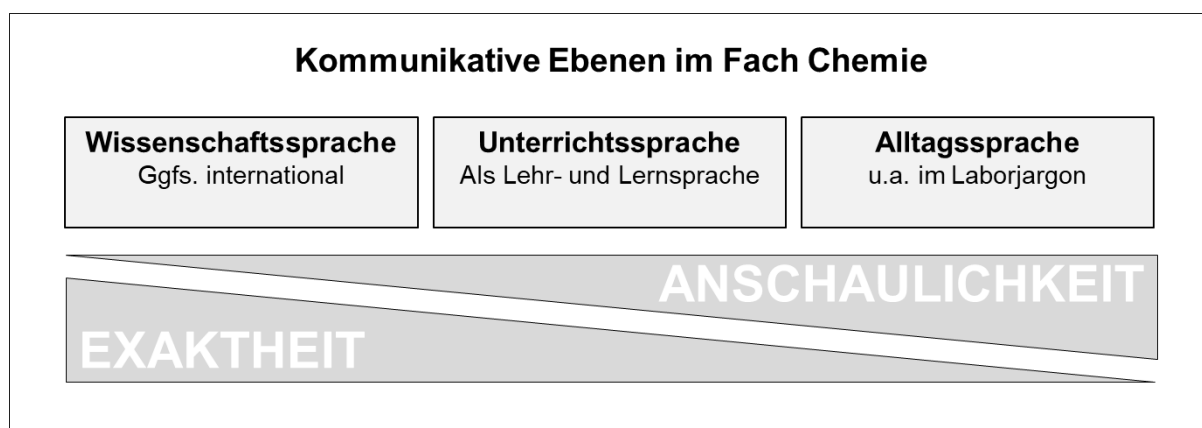


Abbildung 4. Kommunikative Ebenen im Fach Chemie (nach Pfeifer et al., 2002).

Die Wissenschaftssprache umfasst Wissensinhalte, die mit einem hohen Präzisionsgrad einhergehen. Demnach sind die Ausdrucksweisen sachlich exakt und beschreiben unter Berücksichtigung geeigneter Sprachelemente wie Fachbegriffe, je nach Bedarf, mehr oder weniger ausführlich einen chemischen Fachinhalt (Pfeifer et al., 2002). Ein hohes Maß an Exaktheit wird bei dieser Begriffsdefinition ersichtlich, wohingegen die Anschaulichkeit des Fachinhalts stark in den Hintergrund rückt. Im Kontrast dazu steht die Alltagssprache, bei welcher weniger die Exaktheit, sondern mehr die anschauliche Verständlichkeit im Zentrum steht (Pfeifer et al., 2002). Sie schließt chemische Ausdrucksweisen mit tendenziell formlosen oder legeren Redewendungen ein und kann mit Blick auf den Laborjargon auch als Werkstattsprache angesehen werden (vgl. Bliefert et al., 1990). Mit ihr können Alltagsbezüge hergestellt und komplexe Naturwissenschaftsinhalte verständlich auf das Wesentliche reduziert werden. Dabei wird auf Fachbegriffe und detailreiche Fachwissenschaftsinhalte tendenziell verzichtet. Zwischen den beiden kommunikativen Ebenen findet sich die Unterrichtssprache wieder. Sie fungiert im schulischen Kontext als Lehr- und Lernsprache und ist Bindeglied zwischen Alltags- und Wissenschaftssprache (Rincke, 2010). Unter Berücksichtigung der fachlichen Klärung werden essentielle Informationen entnommen und im Sinne der didaktischen Reduktion verständlich zusammengefasst, ohne dabei vollkommen in die Alltagssprache abzuschweifen. Entsprechend pendelt sich in Hinblick auf die Exaktheit und Anschaulichkeit ein mittleres Maß ein, welches durch den ständigen Wechsel und fließenden Grenzübergang der sprachlichen Formen erreicht wird (Pfeifer et al., 2002). Folglich sollten Fach- und Alltagssprache nicht disjunkt (Nerdel, 2017), sondern als Pole eines Kontinuums angesehen werden (vgl. Nitz et al., 2012; Roelcke, 2021).

3.1 Bedeutung und Relevanz (multipler) externer Repräsentationen

In der internationalen Literatur versteht man unter naturwissenschaftlicher Fachsprache „a synergistic integration of words, diagrams, pictures, graphs, maps, equations, tables, charts, and other forms of visual and mathematical expression“ (Lemke, 1998, S. 3). Fachsprache stützt sich damit aus holistischer Perspektive auf dem Umgang mit (multiplen) externen Repräsentationen, d.h. (M)ER, mit welchen ein naturwissenschaftliches Verständnis aufgebaut

werden kann (vgl. Lemke, 1998; Yore & Hand, 2010; Nitz et al., 2014; Fleischer, 2018; Mikelskis-Seifert & Fischler, 2003). ER können zum Beispiel Symbole, Diagramme, Grafiken oder Bilder sein (Nitz et al., 2012; Nerdel, 2017). Obgleich sich im Laufe der letzten Jahrhunderte die Möglichkeiten der visuellen Darstellung chemischer Phänomene geändert haben mag (s. auch Kapitel 4), so blieb ihr Zweck erhalten: Chemiker bedienen sich der Vielzahl an externen Repräsentationen, um (un-) sichtbare chemische Prozesse zu veranschaulichen und das Phänomen selbst zu erklären (vgl. Kozma & Russell, 1997, 2005; Talanquer, 2011). Forschungsbefunde demonstrieren immer wieder die enge Verzahnung des Modellbegriffs mit der Fachsprache (Dori & Kabermann, 2012; Fleischer, 2018; Frick, 2019; Gouvea & Passmore, 2017; Harrison & Treagust, 2000; Mikelskis-Seifert, 2002), indem zwischen Erfahrungs- und Modellwelt differenziert wird. Dabei können die Begriffe *Modell* und *Repräsentationsform* gleichgesetzt werden (vgl. Turro, 1986; Hoffmann & Laszlo, 1991; Gilbert, 1999), wobei Modelle auch eine größere Anzahl an Repräsentationen beinhalten können (Gilbert, 1999). Der Umgang mit diesen Repräsentationsformen hat daher einen großen Einfluss auf das naturwissenschaftliche Arbeiten und die Sicherung fachspezifischer Unterrichtsqualität (Nitz et al., 2014). Es sind vor allem nichtmaterielle Modelle, die als Repräsentationsformen angesehen werden können (Banse, 1973; Hoffmann & Laszlo, 1991; Talanquer, 2011). Der Umkehrschluss ist aber nicht zwingend gegeben, da beispielsweise Texte keine Modelle darstellen (Fleischer, 2018). Die chemische Fachsprache findet sich mit ihren externen Repräsentationen vielfältig in Modellen verschiedenster Dimensionen und ihren zugehörigen Modellierungsprozessen wieder. Dabei steht vor allem die Konstruktion mentaler Modelle, die als interne Repräsentationen zu verstehen sind, im Vordergrund (vgl. Steinbuch, 1977). Sollen interne Repräsentationsformen erfasst werden, so bedarf es einer Externalisierung mittels direkter Befragungen oder Testbearbeitungen per lautem Denken (Ericsson & Simon, 1993; Genter & Whitley, 1997). In Abgrenzung zu den internen Repräsentationen werden die chemischen Inhalte von ER auditiv oder visuell wahrgenommen (Koerber, 2000; Padalkar & Hegarty, 2015). Sie sind physisch zugänglich und können von dem Individuum beobachtet bzw. wahrgenommen werden (vgl. Goldin & Kaput, 1996). Folglich sollten Lernende die Fähigkeit besitzen, verschiedene externe Darstellungsarten situations- und adressatengerecht zu nutzen (Corradi et al., 2014; Gee, 2004; Gräber, 2002; Norris & Phillips, 2003; Schnotz, 2001a, 2002). Die Fachliteratur differenziert zwischen deskriptionalen und depiktionalen externen Repräsentationsformen (vgl. Schnotz, 2002, 2005). In Anlehnung an Fleischer (2018) werden in der vorliegenden Arbeit nicht-materielle Modelle diesen beiden Ausprägungen zugeordnet. Nachstehend werden, orientiert an der Übersicht zu den externen Repräsentationen in der naturwissenschaftlichen Fachsprache von Nerdel (2017), die ER *Text*, *Symbol* und *Bild* hinsichtlich ihrer Einordnung in depiktionale und deskriptionale Darstellungsformen näher beleuchtet.

Depiktionale Repräsentationen. Depiktionale Repräsentationsformen sind Bilder, die sich aus ikonischen Zeichen zusammensetzen. Es wird zwischen drei Bildarten unterschieden: *Realistische Bilder*, *Analogiebilder* und *logische Bilder* (Schnotz, 2005, 2011; Häußler et al., 2015). Realistische Bilder besitzen eine strukturelle Ähnlichkeit mit dem Realobjekt und gleichen demnach einer visualisierten Realität. Ihre Informationsentnahme gestaltet sich schnell und effizient (vgl. Schnotz, 2011). Sie umfassen Umriss- oder Strichzeichnungen, Landkarten, (realistische) Gemälde, Lichtbilder sowie Cartoons (Schnotz, 2002, 2011). Mit Analogiebildern können Strukturen und Funktionsweisen näher beschrieben werden. Exemplarisch für ein Modell kann die Skizzierung von Elektronenwolken zur Erklärung der Aufenthaltswahrscheinlichkeit der Elektronen angeführt werden. Logische Bilder hingegen veranschaulichen abstrakte Phänomene und ähneln dem repräsentierten Gegenstand nicht (Schnotz, 2011). Folglich werden die verschiedenen Diagrammartentypen wie Kreis-, Säulen-, Linien-, Struktur- oder Streudiagramm, dieser Bildart zugewiesen. Nicht immer sind die Übergänge zwischen realistischen und logischen Bildern eindeutig. Schemazeichnungen besitzen beispielsweise, abhängig vom Abstraktionsgrad, Merkmale beider Bildtypen (Beck, 2017). Darüber hinaus können Bilder unterschiedliche Dimensionen besitzen und folglich sowohl zweidimensional als auch dreidimensional sein. Dabei bleibt der Aspekt der Dynamik bei depiktionalen Repräsentationen nicht unberücksichtigt. Filme können als bewegte Bilder und Animationen, im Sinne einer Abfolge von Einzelbildern, oder als bewegte Schemazeichnungen und Grafiken betrachtet werden (Nerdel, 2017; Bétrancourt & Tversky, 2000). Als Erweiterung der Animation wird die Simulation angeführt. Mit ihrem hohen Maß an Interaktivität kann auch sie den depiktionalen Repräsentationsform zugewiesen werden (Nerdel, 2017; Niegemann, 2008). Im Vergleich zu statischen Bildern, können Animationen und Simulationen genutzt werden, um chemische (submikroskopische) Prozesse zu veranschaulichen (vgl. Tversky et al., 2002; Frick, 2019). Sie werden im naturwissenschaftlichen Unterricht häufig eingesetzt und spielen mittlerweile, in Hinblick auf die digitalen Entwicklungen in Schule und Unterricht, eine große Rolle (vgl. Kapitel 4).

Deskriptionale Repräsentationen. Im Gegensatz zu Bildern zählen chemische Texte und Symbole zu den deskriptionalen Repräsentationen, welche als Zeichensysteme mit arbiträren Zeichen zu betrachten sind. Sie sind dem repräsentierten (hier: chemischen) Sachverhalt nicht ähnlich und werden, schriftlich oder mündlich, durch eine Konvention mit diesem verbunden (vgl. Schnotz, 2002). Fachtexte setzen sich aus einer Vielzahl an außersprachlichen Merkmalen zusammen und sollten mit Blick auf das Fach Chemie differenziert betrachtet werden (Beier, 1980). Es wird zwischen kontinuierlichen Texten wie zum Beispiel Fließtexten und diskontinuierlichen Texten, welche Textformen in Schemata oder Diagrammen darstellen können, unterschieden. Schließlich lassen sich, in Hinblick auf die schulische Digitalisierung, auch

Hypertexte den verbalen Repräsentationsformen zuweisen (vgl. Nerdel, 2017). Im naturwissenschaftlichen Kontext sind es Fachtexte, welche sich auf die Auseinandersetzung mit realen Phänomenen konzentrieren und auf deren Beschreibung abzielen. Dabei sind sie aus einer endlichen Anzahl an Sätzen aufgebaut, die ein hohes Maß an inhaltlicher Kohärenz besitzen. Ferner umfassen sie sprachliche Äußerungen, welche aufeinanderfolgend, zusammenhängend, abgeschlossen und sachlogisch sortiert sind (Nitz et al., 2012). Die nähere Begutachtung der Fachtexte verdeutlicht, dass ihnen als Kennzeichen der naturwissenschaftlichen Fachsprache eine Vielzahl an chemischen Begrifflichkeiten zugrunde liegt (vgl. Gilbert, 2005). Dabei setzt sich ein Fachbegriff, d.h. Konzept, aus einer Kombination von Zeichensymbolen oder Lautfolgen zusammen (Schnotz 2001, 2002 nach Nerdel, 2017; Graf, 1989). Er wird als kognitive Einheit verstanden, welcher durch die mentale Verarbeitung Attribute, Sinnzuschreibungen und Richtlinien enthält (vgl. Hoffmann, 1986). Aufgebaut ist der Fachbegriff aus einer Denotation, die den Begriffsumfang sowie seine Bedeutung angibt, und einer Konnotation, welche für die Erzeugung eines weiteren Nebensinns stünde (vgl. Nerdel, 2017). Sie werden genutzt, um fachspezifische Sachzusammenhänge zu veranschaulichen und durch adäquaten und präzisen Einsatz für eine klare Kommunikation im Fachbereich zu sorgen. Im chemischen Kontext werden Fachbegriffe wie „Donator-Akzeptor-Konzept“ oder „Redoxreaktion“ zur Beschreibung chemischer Sachverhalte eingesetzt. Sie stehen jedoch nicht nur für Lernbereiche (vgl. ISB, 2023c), vielmehr wird mit ihnen übergeordnet ein chemisches Phänomen oder ein unsichtbarer Prozess geschildert. Die Vielzahl an Stoffen mit ihren zugehörigen Eigenschaften und Zusammensetzungen fußt auf einer großen Menge an submikroskopischen Abläufen. Eine chemische Reaktion wird nicht nur als solche betitelt, auch die Teilchen mit ihren Strukturen und Prozessen werden definiert. Auf der einen Seite werden chemische Elemente, Stoffe oder Verbindungen mittels Fachbegriff benannt. Dabei stellt der Terminus den Namen eines Fachbegriffs dar und bezeichnet beispielsweise Korrespondenzen wie „Donator-Akzeptor“ oder geht in Form von Trivialnamen auf die Entdecker wie beim „Bohrschen Atommodell“ zurück (nach Nerdel, 2017). Auf der anderen Seite liefert die Nomenklatur der International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) Begriffe für die Namensgebung von Verbindungen. Sie offenbart Richtlinien, mit welchen sich aus den chemischen Struktur- oder Partikelformeln (z.B. Konfigurations- oder Molekülformeln) internationale, einheitliche Namen ableiten lassen (Pfeifer et al., 2002). Im Gegensatz zu Trivialnamen oder arbiträren Strukturen von deskriptionalen Repräsentationen wie dem Begriff „Wasser“ wird aus ihnen sofort ersichtlich, welche chemische Zusammensetzung die beschriebene Formel besitzt (vgl. Mounin, 1981). Mit einem hohen Grad an Präzision erhalten diverse Stoffe, Teilchen, Mechanismen, Funktionen, Abläufe, Sachgegenstände usw. einen expliziten Namen, der sich als Bezeichnung für den Fachbegriff manifestiert und die Weitläufigkeit der chemischen Terminologie kennzeichnet (Pfeifer et al.,

2002). Damit sind Fachbegriffe elementarer Bestandteil der fachwissenschaftlichen Kommunikation und unverzichtbar für das Lehren und Lernen im Fach Chemie (Nerdel, 2017). Folglich kommen sie vermehrt in der Wissenschafts- sowie Unterrichtssprache und weniger in der Alltagssprache zum Vorschein.

Symbole sind aus willkürlichen Zeichen wie charakteristischen Buchstaben (A bis Z), Zahlen und weiteren Zeichen wie zum Beispiel dem Reaktionspfeil (\rightarrow) und deren Zeichenverknüpfungen aufgebaut (Peirce, 1906; Nerdel, 2017). Mit dem Ziel das Verhalten und die Eigenschaften von chemischen Stoffen und Prozessen vorhersagen zu können, werden sie im Fach Chemie vielfältig genutzt (Talanquer, 2011). Abbildung 5 liefert eine Übersicht der unterschiedlichen chemischen Symbolarten:

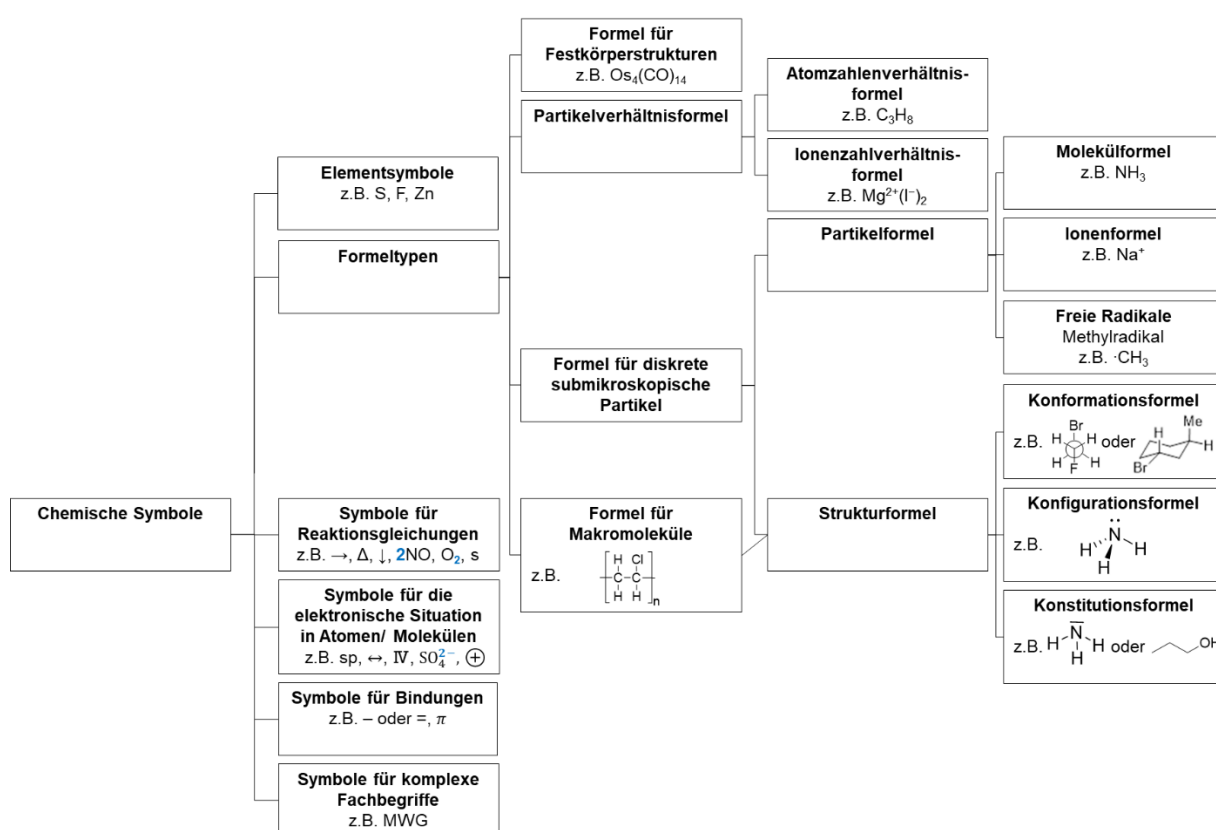


Abbildung 5. Übersicht der Symbolarten für den Fachbereich Chemie (verändert nach Nerdel, 2017; Pfeifer et al., 2002 und Fleischer, 2018).

Abbildung 5 zeigt verschiedene chemische Symbole, die sich in erster Linie in Elementsymbole, Formeltypen, Symbole für Reaktionsgleichungen, Symbole für elektronische Situationen, Symbole für Bindungen und Symbole für sonstige komplexe Fachbegriffe untergliedern lassen. Häufig werden Symbole zur Beschreibung der Stoffe mit dem zugehörigen Stoffnamen verknüpft (vgl. Talanquer, 2011; Fleischer, 2018). Folglich repräsentieren Elementsymbole die Elemente (z.B. „S“ entspricht Schwefel). Formeltypen liefern eine große Darstellungsvielfalt und subsumieren, neben Formeln für Festkörperstrukturen wie Cluster in Halogeniden (z.B.

$\text{Os}_4(\text{CO})_{14}$) und Formeln für Makromoleküle wie Kunststoffe (z.B. Polyvinylchlorid), die elementaren Repräsentationsformen Partikelverhältnisformeln und Formeln für diskrete submikroskopische Partikel. Auf letzteren beiden Formeltypen liegt ein besonderes Augenmerk, da sie mit Blick auf den schulischen Einsatz den Grundstock für das chemische Verständnis liefern und sich größtenteils aus unterschiedlichen Elementsymbolen zusammensetzen (vgl. Abbildung 5). Demzufolge können Partikelverhältnisformeln eine Relation von Atomen (Atomzahlenverhältnisformel), z.B. MgI_2 , oder von Ionen (Ionenzahlenverhältnisformel), z.B. $\text{Mg}^{2+}(\text{I}^-)_2$, angeben. Die Bandbreite der Formeln für submikroskopische Partikel ist größer. Sie zielt explizit auf das Unsichtbare ab und unterscheidet zwischen Partikel- und Strukturformeln, welche die Teilchen symbolisch repräsentieren (vgl. Pfeifer et al., 2002). Dabei fassen Partikelformeln Moleküle (z.B. NH_3), freie Radikale (z.B. $\cdot\text{CH}_3$) und Ionen (z.B. Na^+) zusammen (vgl. Abbildung 5). Auch Summenformeln fallen in diese Kategorie und geben die Beschaffenheit und Anzahl der Atome an, wobei ihre strukturelle Anordnung unberücksichtigt bleibt (Mounin, 1981). Im Vergleich dazu stehen Strukturformeln, die zwar auch als Symbole einem arbiträren Zeichensystem zugrunde liegen, jedoch zusätzlich mit unterschiedlich hohen Abstraktionsgraden die Teilchengestalt visualisieren. Entsprechend sind sie Modelle, deren Realitätsnähe tendenziell höher ist. Nach Fleischer (2018) besitzen Strukturen, die beispielsweise mittels Skelett- oder Valenzstrichformel veranschaulicht werden, eine planare Gestalt. Sie geben symbolisch Einblick in die atomare Zusammensetzung und ihre zugehörige Verknüpfungsreihenfolge. Der räumliche Aufbau wird jedoch vernachlässigt (Mounin, 1981). Als weitere Unterkategorie von Strukturmodellen lassen sich Konfigurationsformeln, wie Fischer-Projektionen oder Keil-Strich-Formeln, und Konformationsformeln, wie Sägebock- und Newman-Projektionen oder Wannens- bzw. Sesselkonformationen, anführen (s. Abbildung 5). Sie veranschaulichen dreidimensional die räumliche Anordnung einer chemischen Verbindung und unterstützen damit das Lernen von und mit komplexen Stoffen, einschließlich ihrer strukturellen Besonderheiten (vgl. Nerdel, 2017; Mounin, 1981). Die Stereochemie stützt sich auf diese beiden Formeltypen, wobei Konfigurationsformeln Rotationen um Einfachbindungen vernachlässigen. Aufgrund der Anordnung arbiträrer Zeichen in ein räumliches Strukturgefüge vereinen sich symbolische und ikonische Elemente. Die räumliche Gestalt, welche zusätzlich durch die Symbolschreibweise erweitert wird, zieht einen hohen ikonischen Modellcharakter nach sich. Strukturmodelle wie die Keil-Strich-Formel oder Newman-Projektion besitzen sowohl einen symbolischen als auch einen ikonischen Charakter (halb-ikonisch nach Fleischer, 2018) und lassen sich je nach räumlicher Gestalt sowohl in die *symbolische* als auch in die *bildliche* Form einstufen (vgl. Fleischer, 2018). Aus der Verknüpfung verschiedener Formeltypen oder Elementsymbole und weiteren chemischen Symbolen werden sodann Reaktionsgleichungen konstruiert. Insbesondere sie sind charakteristisch für die chemische Fachsprache, da sie durch einheitliche Verknüpfungen

von Strukturformeln mit weiteren Zeichen wie Reaktionspfeilen, Symbolen für Reaktionsbedingungen (z.B. Δ), Niederschlag (\downarrow) oder Phasen (z.B. (s)) sowie Koeffizienten und Indizes (s. *Symbole in Reaktionsgleichungen* in Abbildung 5) chemische Phänomene veranschaulichen. Ferner werden *Symbole für elektronische Situationen in Molekülen und Atomen* herangezogen, um Teilchen (-prozesse) mittels Angabe von Ladung (z.B. Na^+), Oxidationszahl (z.B. II), Hybridisierung (z.B. sp^2) oder Mesomerie (\leftrightarrow) detailreich zu beschreiben. Auch Bindungen können mittels Symbolen für Multiplizität (z.B. =) oder Symmetrie (z.B. π) besser veranschaulicht werden. Die Vielzahl an Symbolen erlaubt eine präzise und rasche Schilderung chemischer bzw. physikalischer Prozesse und ermöglicht es komplexe Mechanismen wie zum Beispiel den einer Substitutionsreaktion aus der organischen Chemie mittels Angriffe oder Umlagerungen von Ladungen explizit zu verdeutlichen (vgl. Bernholt et al., 2012).

Multiple externe Repräsentationsformen. Die umfassende Menge an repräsentativen Möglichkeiten zum Kommunizieren in der Chemie (Nitz et al., 2014) verdeutlicht, dass die ER nicht nur singular vorliegen. Sie können mit einer Vielzahl an weiteren Zeichenverknüpfungen verbunden werden (Beck & Nerdel, 2015). Häufig stützen sich ER verbal oder/und schriftlich gegenseitig, indem Symbole mit Bildern oder Texten kombiniert werden. Sobald sich mindestens zwei ER miteinander vereinen, handelt es sich um multiple externe Repräsentationen (MER) (vgl. Ainsworth, 2006). Die Schwächen, die Lernende bei der Verwendung von nur einer ER haben, können gegebenenfalls durch die Ergänzung einer weiteren ER ausgeglichen werden (Ainsworth, 2014; Mayer & Moreno, 2002a). Die Forschungen von Ainsworth (1999) sprechen MER im Kontext Lernen drei Hauptfunktionen zu:

1. **Complementary Roles:** MER sollten so eingesetzt werden, dass sie sich ergänzen und infolgedessen kognitive Verarbeitungsprozesse unterstützen. Dabei können sich die eingesetzten ER in ihrem Sinngehalt sowie dem zu veranschaulichendem Prozess gleichen oder unterscheiden. Durch die Verknüpfung ihrer komplementären Rollen kann der Lernprozess positiv beeinflusst werden. Dabei können sich die verschiedenen Darstellungen, aus denen sich die MER zusammensetzen, inhaltlich gänzlich unterscheiden oder auch teilweise überlappen.
2. **Constrain Interpretation:** Als weitere Funktion nennt Ainsworth (1999) die Einschränkung von Interpretationsmöglichkeiten. MER sollen Lernende in ihrem Lernprozess dahingehend unterstützen, dass die Verwendung einer ER und ihre Interpretation nicht voreilig zur Konstruktion einer weiteren ER führt. Durch den Einsatz einer zusätzlichen, vertrauten ER, kann beispielsweise die Missinterpretation einer abstrakteren ER verhindert und die Auffassung dieser lernwirksam gefördert werden. Die zweite ER soll folglich keine Informationen darbieten, sondern lediglich die Informationsentnahme der ersten, abstrakteren ER unterstützen. Arbeitet der Lernende mit einer ER, die inhärente

Eigenschaften besitzt, so kann auch auf diese Art und Weise die Interpretation der zweiten ER positiv beeinflusst werden.

3. **Construct Deeper Understanding:** Schließlich soll die Verknüpfung verschiedener Repräsentationen zu einem tieferen Verständnis führen, indem komplexe Sachverhalte anschaulich begutachtet und effizient genutzt werden können. Das Abstraktionsvermögen soll unterstützt werden, dass sich die Wissenserweiterung durch Verallgemeinerung der Informationen anschließen kann. Das Lernen erlangt eine „höhere Ebene“ der geistigen Verarbeitung, da mentale Modelle konstruiert werden und der Konzeptentwicklung ein angehobener Organisationsgrad zugrunde liegt. Entsprechend soll der Wissensaufbau durch die gegenseitige Informationsanreicherung der ER, bezogen auf ihre zugrunde liegenden Ablese- und Konstruktionsprozesse, begünstigt werden (Beck, 2017). Angesichts dessen sind es die Übersetzungsleistungen und das Herstellen von Beziehungen zwischen den ER, welche neue Sichtweisen ermöglichen und den Elaborationsprozess maßgeblich prägen (vgl. Ainsworth, 1999; Corradi et al., 2014; Gee, 2004).

Ainsworth (1999) extrahiert die verschiedenen Anwendungen von MER und spricht diesen bei korrektem Einsatz eine hohe Lernwirksamkeit zu. In ihrem *Framework For Learning with Multiple Representations (DeFT)* schlägt sie für das Lernen mit MER vor, als grundlegende Aspekte die Gestaltung, Funktionen und die kognitive Aufgabe der MER genauestens zu beachten (Ainsworth, 2006). Auch Seufert (2003) verweist auf die Wichtigkeit, Zusammenhänge von ER in MER zu diagnostizieren, wenn es um den Aufbau kohärenter Wissensstrukturen geht. Die Forschungsergebnisse von Schnotz und Bannert (2003) demonstrieren, dass MER vor allem für Lernende mit einem niedrigen Vorwissen hilfreich sein können, da die integrative Text-Bild-Verarbeitung die Bildung mentaler Modelle unterstützt (s.u. Kapitel 3.3). Die Möglichkeiten von MER für den Einsatz im Chemieunterricht sind daher exorbitant (vgl. Rau, 2020). Sie gestatten horizontale und vertikale Perspektivenwechsel, indem zwischen verschiedenen Systemebenen der Chemie sowie unterschiedlichen Fachinhalten gewechselt werden kann (Tsui & Treagust, 2013; Beck, 2017). Aus fachdidaktischer Sicht ist es eben jene Fülle an Repräsentationen und ihren Verknüpfungen, die zu einer schnelleren und effizienteren Informationsaufnahme führen kann (vgl. Leisen, 2004). Damit stehen (M)ER im Zentrum der chemischen Fachsprache und beeinflussen das Lehren und Lernen chemischer Inhalte durch ihre diversen Einsatzmöglichkeiten maßgeblich (Nitz et al., 2014; Yore & Hand, 2010).

3.2 Representational Competence

Zwar ist der Umgang mit (M)ER als Grundvoraussetzung für den erfolgreichen Wissensaufbau anzusehen (vgl. Fleischer, 2018), jedoch ist die Anwendung von (M)ER für einen fach- und sachgerechten Wissensaustausch bei Lernenden nicht trivial. Es scheint äußerst herausfordernd zu sein, (M)ER angemessen zu interpretieren und inhaltlich korrekte Beziehungen sowie Translationen zwischen den Darstellungsformen herzustellen (Nerdel, 2017; Kozma & Russell, 1997; Shehab & BouJaoude, 2017). Da der Umgang mit Repräsentationsformen aber ein Kernelement naturwissenschaftlicher Kompetenz ist (Hettmannsperger, 2015), sollten sich Lernende gewisse sprachliche Kompetenzen aneignen. Die verschiedenen Darstellungsarten sollen situations- und adressatengerecht konstruiert, ineinander übersetzt und interpretiert werden (Corradi et al., 2014; Gee, 2004; Norris & Phillips, 2003; Schnotz, 2001b, 2002). Diese Kompetenzen werden auch als *Representational Competence* bezeichnet (Kozma & Russell, 1997, 2005). Representational Competence umfasst Fertigkeiten und Fähigkeiten, mit welchen ein Individuum die Vielzahl an Darstellungsformen, einzeln oder in Kombination, reflektiert verwendet, über chemische Phänomene nachdenkt, kommuniziert und in Bezug auf ihre apperzeptiven physikalischen Entitäten und Prozesse handelt. Vor allem jene Personen, die eine ausgeprägte Representational Competence besitzen, können die verschiedenen Darstellungsformen versiert zur Erklärung chemischer Phänomene, Problemlösung oder für Vorhersagen über chemische Prozesse nutzen (Kozma & Russell, 2005). Dabei beinhaltet die Representational Competence die drei wesentlichen Schwerpunkte *Konstruktion*, *Interpretation* und *Translation* von (M)ER in einer fachspezifischen Domäne (vgl. Nerdel, 2017; Beck & Nerdel, 2015) und kann wie folgt beschrieben werden (zusammengefasst nach Kozma & Russell, 2005):

Representational Competence ist die Fähigkeit...

1. (M)ER für die Beschreibung beobachtbarer chemischer Prozesse unter Berücksichtigung ihrer zugrunde liegenden submikroskopischen Entitäten und Prozesse zu verwenden.
2. (M)ER zu konstruieren oder auszuwählen und ihre Eignung für den jeweiligen Sachverhalt zu erklären.
3. Texte bzw. Worte zu nutzen, um Eigenschaften sowie Besonderheiten einer Darstellungsform und ihre Erscheinungsmuster zu analysieren und identifizieren.
4. Unterschiede zwischen den (M)ER zu beschreiben und zu erklären, auf welcher heterogenen Art und Weise (M)ER einen identischen Sachverhalt demonstrieren.
5. diverse (M)ER miteinander zu kombinieren und ihre Beziehung zueinander zu erklären.

6. eine erkenntnistheoretische Haltung einzunehmen, dass (M)ER einem chemischen Sachverhalt modellhaft ähneln und diesen in unterschiedlich ausgeprägten Abstraktionsgraden replizieren können, aber dem beobachteten Phänomen nicht entsprechen.

7. (M)ER sowie deren Eigenschaften evidenzbasiert im Alltag zu verwenden, um Behauptungen zu stützen, Folgerungen aufzuzeigen und Vorhersagen über beobachtbare chemische Phänomene zu treffen.

Diese Fähigkeiten stützen sich insbesondere auf Translationen zwischen den ER (Beck & Nerdel, 2015; Fleischer, 2018). Entsprechend forciert die chemische Fachsprache ein wechselseitiges in Relation setzen von verschiedenen (M)ER (Kozma & Russell, 2005; Nerdel, 2017).

3.3 Multimediales Lernen aus kognitionspsychologischer Sicht

Besitzt ein Lernender eine stark ausgeprägte Representational Competence (vgl. Kapitel 3.2), so kann ein tiefes chemisches Grundverständnis aufgebaut werden und die Lernmotivation positiv beeinflusst werden (Ainsworth, 1999; Rau, 2017a). Die simultane Verwendung mehrerer Repräsentationen verknüpft oftmals verschiedene Informationsinhalte. Entsprechend werden beispielsweise mit einem Symbol Teilchenstrukturen und dem zugehörigen Text die Eigenschaften eines Stoffes beschrieben. In Kombination würden sodann beide ER miteinander kohärent verknüpft und durch die repräsentativen Wechsel zwischen Stoff- und Teilchenebene angeregt werden (vgl. Kapitel 2.1). Derart sollten vollständigere mentale Modelle konstruiert werden, welche zu einer optimierten Organisation und Integration in das Gedächtnis führen (Stull et al., 2016). Auch Mayer (2021) bestätigt diesen positiven Effekt (s.u. *Multiple-Representation-Principle*; Ainsworth, 2014). Angesichts dessen nimmt das multimediale Lernen mit seinen kognitiven Verarbeitungsprozessen bei der Verwendung multipler externer Repräsentationen eine tragende Rolle ein. Die Fachsprache mit all ihren ER ist ein Konstruktionsmittel, wobei der Lernende die Signalbedeutungen und semantischen Vernetzungen selbst entwickelt (Leisen & Mentges, 2009). Lehr- und Lernmedien sind zwar nützlich, doch vermitteln sie dem Lernenden das chemische Verständnis nicht direkt. Sie regen lediglich kognitive Verarbeitungsprozesse an, die dann einen kumulativen Wissensaufbau nach sich ziehen können (Schnotz, 2005).

Häufig wird in der fachdidaktischen Forschung auch auf die Cognitive Theory of Multimedia Learning von Mayer (2014) zurückgegriffen. Dabei wird das Lernen als aktiver Informationsverarbeitungsprozess über zwei Sinneskanäle in Anlehnung an Paivo (1986) und zwei Repräsentationsmodi angesehen, wobei die Kapazität der Informationsverarbeitung in beiden Kanälen begrenzt ist. Es kann folglich nur eine bestimmte Menge an Informationen simultan vom sensorischen Register aufgenommen werden (vgl. Rey, 2009). Mayer (2014) unterscheidet bei der Codierung zwischen dem Repräsentationsmodus, der die (non-) verbalen Stimuli *Text* und *Bild* fokussiert, und der sensorischen Modalität, d.h. über welche Sinne die Information

aufgenommen wird (auditiv vs. visuell). Die Kanäle stehen in Wechselwirkung zueinander. Sich für oder gegen eine der beiden Konzeptualisierungsmöglichkeiten zu entscheiden, ist also nicht erforderlich (Rey, 2009; Mayer, 2014). Vielmehr steht die aktive Auseinandersetzung mit den gegebenen Repräsentationen im Vordergrund, welche positive Lernergebnisse ermöglicht.

Auch Schnotz (2001) stützt sich mit seinem integrativen Modell des Text- und Bild-Verständnisses auf den drei kognitiven Lernprozessen: Informationsselektion, -organisation und -integration (vgl. Schmeck, 2011; Mayer, 2014). Folglich nimmt er an, dass das Text-Bild-Verstehen eine duale Kodierung an textbasierten und bildlichen Informationen im auditiven und visuellen Register erfordert, welche anschließend im Arbeitsgedächtnis (vgl. Baddeley, 1992), mittels Integration des Vorwissens aus dem Langzeitgedächtnis, bewusst verarbeitet wird (Rey, 2009). Die Ansätze von Schnotz (2001) und Mayer (2014) weisen viele Parallelen auf. Schnotz (2001) unterscheidet jedoch nicht nur zwischen Wort und Bild (vgl. Mayer, 2014), sondern grenzt deskriptionale von depiktionalen Repräsentationen voneinander ab. Ferner konzentriert er sich zwar analog zur Cognitive Theory of Multimedia Learning auf die drei unterschiedlichen Arbeitsspeicher nach Atkinson & Shiffrin (1971) und die Informationsweiterverarbeitung in zwei Subsystemen (Baddeley, 1992). Zusätzlich bindet er aber Konzepte zu propositionalen Repräsentationen und mentalen Modellen (Kosslyn, 1994; Rey, 2009; van Dijk & Kintsch, 1983) in seine Annahmen ein. Im Vergleich zu Mayer (2014), fasst er die Möglichkeiten der Informationsentnahme, -verarbeitung und -speicherung weiter, geht in Hinblick auf die duale Kodierung mehr in die Tiefe und betrachtet auch die taktilen Formen während des Umgangs mit MER (vgl. Rey, 2009). Folglich werden nachstehend die kognitionspsychologischen Prozesse des multimedialen Lernens mit dem integrierten Modell des Text-Bild-Verstehens von Schnotz (2001) für das Fach Chemie mit Blick auf die MER *Text und Symbol* beschrieben (vgl. Abbildung 6). Im integrierten Modell von Schnotz (2001, 2005) steht das Wechselspiel der Denkprozesse bei der individuellen Text- und Bild-Verarbeitung im Gedächtnis, welches über verschiedene Sinnesmodalitäten aktiviert werden kann, im Vordergrund (Nerdel, 2017; Mayer, 2014). Gemäß Schnotz (2005) soll beim multimedialen Lernen die deskriptionale Repräsentation mit der depiktionalen Repräsentation im Arbeitsgedächtnis aktiv verknüpft werden. Mit Blick auf das Forschungsdesiderat dieser Dissertation werden den deskriptionalen Repräsentationen Texte wie Fachbegriffe mit ihren Trivialnamen und sämtliche Symbole ohne ikonischen Charakter mit ihren Zeichenverknüpfungen (z.B. Reaktionsgleichung mit Valenzstrichschreibweisen) zugeordnet. Hingegen werden die depiktionalen Repräsentationen durch räumlich anschauliche Teilchenstrukturmodelle (z.B. Keil-Strich-Formel des Molekülmodells von Ammoniak) oder weitere ikonische Modelle (z.B. Kalottenmodell von NH_3) charakterisiert.

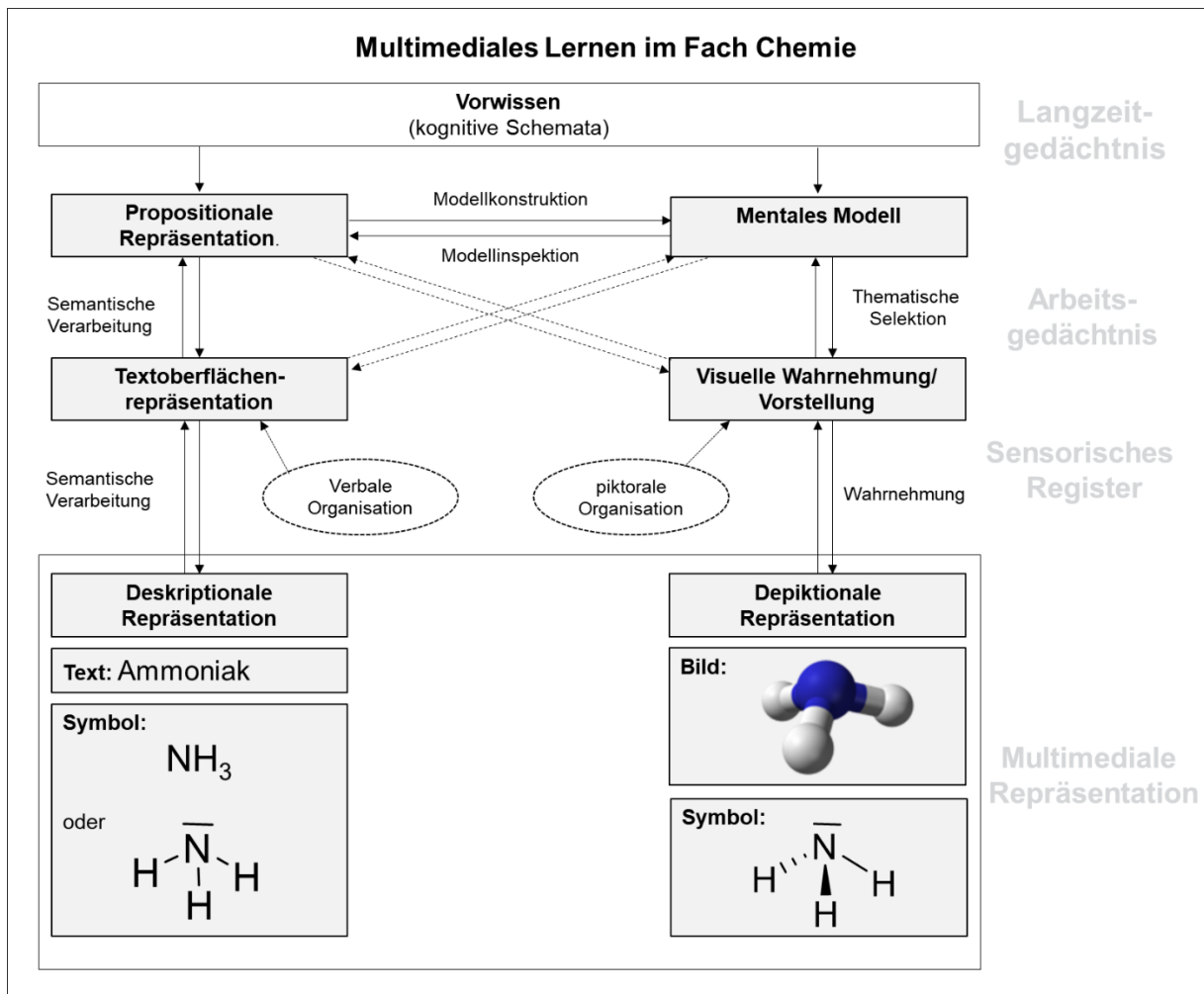


Abbildung 6. Multimediales Lernen exemplarisch für chemische Repräsentationen (angepasst nach Schnotz, 2005).

Abgegrenzt durch die textliche oder ikonische Zeichenstruktur erfolgt über zwei Wahrnehmungskanäle in einem ersten Schritt die sensorische Informationsaufnahme und in einem zweiten Schritt deren interne Weiterverarbeitung (vgl. Schnotz, 2001; Mayer, 2014). Nachdem die deskriptionale Repräsentation erfasst wurde, wird sie im Arbeitsgedächtnis in die interne Textoberflächenrepräsentation, eine sogenannte Textbasis, überführt. Diese Verarbeitung erfolgt subsemantisch und ist durch eine syntaktische Strukturierung gekennzeichnet (vgl. Schnotz 2001, 2005). Gefolgt von einer semantischen Verarbeitung, welche auf der Organisation kognitiver Schemata beruht, wird eine propositionale Repräsentation konstruiert (vgl. Schnotz, 2001, 2014). Die Proposition, als kognitive Einheit, besteht aus einem Prädikat sowie weiteren Argumenten und speichert sodann die deskriptionale Information (Rey, 2009). Visuelle Daten werden, verglichen mit den auditiven Informationen, für eine geringere Zeit im jeweiligen Register gespeichert. Daher sollte sich die Aufmerksamkeit auf ein Register richten (Rey, 2009; Schnotz, 2005). Eine depiktionale Repräsentation durchläuft eine analoge Strukturbildung wie beim Textverstehen. Nachdem oberflächliche Bildmerkmale präattentiv wahrgenommen wurden, wird eine interne, visuelle Vorstellung gebildet. In einem semantischen attentiven Prozess werden die Merkmalszusammenhänge untersucht und interpretiert, sodass

sich die Konstruktion des mentalen Modells im Arbeitsgedächtnis anschließen kann (Frick, 2019; Nerdel, 2017). Dabei kann bei der Bildung des mentalen Modells sowie der propositionalen Repräsentation, je nach Bedarf des Lernenden, auf die kognitiven Schemata des Vorwissens zurückgegriffen werden (vgl. Rey, 2009; Schnotz & Bannert, 2003). Das Arbeitsgedächtnis speichert demnach die erfassten Informationen aus den sensorischen Registern so lange zwischen, bis diese durch die Informationen des Langzeitgedächtnisses aufgearbeitet wurden (Baddeley, 2007, 2002). Mithilfe des Vorwissens lassen sich nach Schnotz (2005) Defizite der externen Repräsentation sowie geringe Kapazitäten im Arbeitsgedächtnis oder ein Mangel an der propositionalen Repräsentation ausgleichen (Rey, 2009). Ferner kann das Vorwissen im Langzeitgedächtnis um das im Arbeitsgedächtnis gespeicherte Wissen ergänzt werden, was sich wiederum positiv auf weitere Lernprozesse auswirken kann (Rey, 2009; Mayer, 2002). Auch stehen die beiden kognitiven Gedankenkonstrukte in Wechselwirkung zueinander. Demzufolge könnte im Zuge einer Modellkonstruktion eine propositionale Repräsentation in ein mentales Modell überführt werden oder umgekehrt (Modellinspektion, vgl. Abbildung 6). Wurde beispielsweise eine propositionale Repräsentation, nach erfolgreicher Modellinspektion, gebildet, so können letztlich auf Basis der ursprünglich wahrgenommenen Bilder und ihrer kognitiven Verarbeitungsprozesse Texte verbalisiert werden (vgl. Nerdel, 2017). Nach Betrachtung eines chemischen Textes, dessen kognitive Gedächtnisprozesse über die Konstruktion einer Proposition in eine Modellkonstruktion münden, könnte die Generierung des mentalen Modells im weiteren Verlauf zur Verschriftlichung und damit Externalisierung einer bildlichen Darstellung führen (vgl. Nerdel, 2017). Im Zentrum des Ansatzes von Schnotz (2001, 2005) stehen eben jene mentalen Transformationsprozesse im Arbeitsgedächtnis zwischen propositionaler Repräsentation und mentalem Modell. Werden deskriptionale und depiktionale Repräsentationen gleichzeitig verarbeitet, so können die Informationen mittels Modellinspektion und -konstruktion verglichen und zusammengeführt werden (vgl. Nerdel, 2017; Schnotz & Bannert, 2003). Dabei spielt es keine Rolle, ob die codierte Information neu oder alt ist (vgl. Schnotz, 2005). Handelt es sich bei der registrierten Repräsentationsform um eine unbekannt Information, so kann mithilfe des Ansatzes von Schnotz (2001) eine nachhaltige Wissensveränderung erzielt werden.

Ausgewählte Gestaltungsprinzipen für den Umgang mit (M)ER. Die Verwendung von MER kann sich positiv auf das Lernen der chemischen Fachsprache auswirken und dadurch einen kumulativen Wissensaufbau unterstützen. Junge Lernende müssen hierfür repräsentative Kompetenzen (vgl. Kapitel 3.2) erlangen, um angemessen über chemische Fachinhalte kommunizieren zu können. Multimediales Lernen kann jedoch aus kognitionspsychologischer Perspektive höchst komplex sein (Nerdel, 2017; Kozma & Russell, 1997; Shehab & BouJaoude, 2017) und benötigt geeignete Voraussetzungen, um initiiert zu werden. Gemäß der Cognitive

Load Theory nach Sweller (2011) geht die kognitive Verarbeitung von (M)ER mit einer kognitiven Anstrengung einher, die sich in eine intrinsische, extrinsische und lernbezogene Belastung (*Intrinsic Load*, *Extraneous Load* und *Germane Load*) untergliedern lässt (Kalyuga, 2011). Der *Intrinsic Load* basiert auf der Grundstruktur der Informationen, d.h. den Fachinhalten, die sich der Lernende zum Erlangen der Lernziele aneignen muss. Der *Extraneous Load* entsteht durch die Art und Weise, wie das zugehörige Lernmaterial konzeptionell aufbereitet wurde, kann sich unter anderem auch auf das Vorwissen beziehen (Sweller & Chandler, 1994) und stellt eine zusätzliche kognitive Belastung dar. Aus dem Zusammenspiel dieser beiden kognitiven Anstrengungen ergibt sich der *Germane Load*, der als Ressource des Arbeitsgedächtnisses die kognitive Kapazität für das Lernen selbst bereithält (vgl. Kalyuga, 2011). Die lernbezogene Belastung ist für die Ausbildung kognitiver Schemata verantwortlich, die in das Langzeitgedächtnis überführt werden (Rey, 2009). Folglich sollte vor allem der *Extraneous Load* möglichst klein gehalten werden, sodass sich der *Germane Load* erhöhen kann (Sweller, 2011). Die Verantwortung liegt demnach auch bei dem Lehrenden, der das entsprechende Lernmaterial zur Verfügung stellt (vgl. Mayer & Fiorella, 2021). Beispielsweise sollten Bilder so gestaltet werden, dass die Repräsentationen verständlich sind und vorzugsweise einem mittleren Abstraktionsgrad entsprechen. Ferner können farbliche Markierungen die Aufmerksamkeit zwar auf Wesentliches lenken, sollten aber bedacht und nicht übermäßig eingesetzt werden (Eitel & Scheiter, 2015; Nerdel, 2017). Angesichts dessen werden im Folgenden sechs ausgewählte Multimedia-Design-Prinzipien (nach Fiorella & Mayer, 2021) vorgestellt, welche bei Beachtung die Text-Bild-Integration erfolgsversprechend unterstützen können (vgl. Rau, 2017a; Maresch, 2006):

- *Multiple Repräsentationen*: Laut Mayer (2021b) ist die Kombination aus Wörtern und Bildern lernförderlicher als ihre singuläre Nutzung.
- *Kohärenz*: Text und Bild sollten kohärent zueinander sein, indem sie sich aufeinander beziehen und folgerichtig ergänzen (Mayer & Fiorella, 2021).
- *Modalität*: Grafiken sollten mit einem gesprochenen (nicht geschriebenen Text erläutert werden (Mayer & Pilegard, 2005).
- *Redundanz*: Einer übermäßig hohen kognitiven Belastung kann entgegengewirkt werden, indem Redundanz vermieden wird und beispielsweise die Präsentation von gesprochenem und geschriebenem Text identischen Inhalts nicht simultan erfolgt (Kalyuga & Sweller, 2014).

Eine zentrale Rolle in der vorliegenden Arbeit nehmen das *Kontiguitätsprinzip* nach Fiorella und Mayer (2021) sowie das *Split-Attention-Prinzip* nach Ayres und Sweller (2021) ein:

In Hinblick auf die *Kontiguität* wird zwischen Raum und Ort unterschieden. Das Prinzip der räumlichen Kontiguität besagt, dass es lernförderlich ist, wenn Wörter und die dazugehörigen

Bilder physisch integriert und nicht voneinander getrennt werden. Nach dem Prinzip der zeitlichen Kontiguität sollten daher Wörter und Bilder gleichzeitig und nicht zeitlich versetzt präsentiert werden. Die Studienergebnisse von Altmeyer et al. (2020), Johnson und Mayer (2012), Mayer und Moreno (2002b), Srinivasan und Crooks (2006) oder Schröder und Cenkci (2018) bestätigen, dass Lernende deutlich bessere Leistungen erzielen, wenn die ER räumliche Nähe besitzen. Sobald Text und Bild ineinander integriert werden, können Lernende gezielter Beziehungen zwischen den komplementären Informationsquellen herstellen. In einer Studie von Mayer und Anderson (1991) zeigte sich, dass Studierende mit einer simultanen Darbietung von auditiven und visuellen Lernmaterial in Form von erzählten Animationen bessere Lernergebnisse erzielten als Studierende, denen die Informationen zeitlich versetzt präsentiert wurden. Eine gleichzeitige Darbietung von Wörtern und Bildern verhindert demnach unnötige kognitive Belastungen. Entsprechend sollte insbesondere bei der Gestaltung digitaler Lernumgebungen, die sich auf dynamischen Animationen oder Simulationen stützen, dieser Aspekt berücksichtigt werden.

Split-Attention bedeutet in der Übersetzung „Gespaltene Aufmerksamkeit“ und liegt dann vor, wenn der Lernende seine Aufmerksamkeit auf mehrere räumlich oder zeitlich voneinander getrennte Informationsquellen richtet und diese mental miteinander kombinieren muss, wobei jede Informationsquelle essentiell für das Verständnis ist (Ayres & Sweller, 2021). Nachdem die Beziehung zwischen den verschiedenen Informationsquellen mental hergestellt werden muss, ist der Lernende gezwungen auf seine mentalen Ressourcen zurückzugreifen und sich einer unnötigen Suche nach Beziehungen auszusetzen. Dies führt zu einer hohen kognitiven Belastung und stört folglich das multimediale Lernen (Ayres & Sweller, 2021). Zahlreiche Studien mit unterschiedlichen Bedingungen demonstrieren Lernerfolge, wenn es um die Vermeidung von Split-Attention geht (Chandler & Sweller, 1991; Gordon et al., 2016; Hausmann & Vuong, 2012; Mayer & Moreno, 1998; Mutlu-Bayraktar et al., 2022; Schröder & Cenkci, 2018). Jedoch sollte beachtet werden, dass das Prinzip nicht durchweg anwendbar ist. Entsprechend wäre es nicht sinnvoll, einen langen Fließtext in ein Bild zu integrieren. Das Prinzip sollte nur dann angewandt werden, wenn mehrere Informationsquellen für sich genommen unverständlich sind (z.B. Prozesse auf Teilchenebene ohne ihre zugehörigen Beobachtungen auf Stoffebene). Überdies stellt Split-Attention bei Lernumgebungen mit hoher Interaktivität eine Gefahr dar. Schließlich sollten die Voraussetzungen der Lernenden stets begutachtet werden, da sie die Grundlage für das multimediale Lernen bilden und bei der Gestaltung von Unterrichtsmaterial gezielt untersucht werden müssen (Ayres & Sweller, 2021).

3.4 Schwierigkeiten im Umgang mit der chemischen Fachsprache

Neben den Herausforderungen beim Modellieren zwischen Stoff- und Teilchenebene (vgl. Kapitel 2.2.2) ist es der Umgang mit (M)ER, welcher höchst komplex für Lernende sein kann (Taber, 2013; Kozma & Russell, 1997). Entsprechend kann das Denken in den drei Ebenen

nach Johnstone (2000) von den Schwierigkeiten auf repräsentativer Ebene beeinflusst werden. Komplexe Attribute (z.B.: die neutralisierte Lösung) oder Formulierungen mit zahlreichen Fachbegriffen (Bsp.: Das Oxidationsmittel wird selbst reduziert) sind für Lernende oft alltagsfern (vgl. Rincke, 2010). Ferner fordern symbolische Notationen ein hohes Abstraktionsvermögen (Leisen, 2005). Studien decken immer wieder auf, welche große Herausforderung es beispielsweise für Schüler ist, Informationen aus Veranschaulichungen wie Bildern zu entnehmen (vgl. Ainsworth, 1999; Beck, 2017; von Kotzebue & Nerdel, 2012; Weidenmann, 1988). In Kapitel 3.2 wurde dahingehend bereits auf die Representational Competence verwiesen, die für einen erfolgreichen Wissensaufbau zwingend notwendig, aber nicht immer leicht zu erwerben, ist (Ainsworth, 1999, 2006). Dabei ist nicht nur das Übersetzen zwischen (M)ER und das Herstellen von Beziehungen schwierig, bereits die Informationsentnahme von ER wie Diagrammen ist mit großen kognitiven Herausforderungen verbunden (Beck & Nerdel, 2015; Kotzebue & Nerdel, 2012; Lachmayer et al., 2007). Auch die angemessene Verwendung von Indizes und Koeffizienten kann als beständiges Problem im Chemieunterricht angeführt werden. Abermals tritt ein *Representation Dilemma* auf, da die visuellen Darstellungen bei den Lernenden für Verwirrung sorgen. Schließlich kommt den (M)ER eine Doppelrolle zu, weil sie einerseits selbst in Hinblick auf die chemische Fachsprache erlernt werden sollen und andererseits einen Informationsgehalt besitzen, der einen chemischen Sachverhalt abbildet, den es zu erlernen gilt (Ainsworth 2006; Rau, 2017b, 2020). Ferner sind es naturwissenschaftliche Gespräche mit den Peers, Erwachsenen und der Familie, die die Aufnahme von neuen, noch nicht fest im Langzeitgedächtnis verankerten Informationen, stören können. Auch Begriffe der Alltagssprache (z.B. Teilchen), die im Alltag synonym oder homonym genutzt werden, können Verständnisprobleme erzeugen (vgl. Rincke, 2010). Es schließen sich sodann Inferenzen an, welche zu Schwierigkeiten beim Erkennen des Teilchenkonzepts in Symbolen oder einem Durchmischen von Stoff- und Teilchenebenen bei Erläuterungen von chemischen Phänomenen führen (vgl. Bernholt et al., 2012; Barke, 2006). Daher ist es eine offene Frage, wie Lernprozesse, auch mit Blick auf die spätere Vermittlung im Unterricht, bei Chemielehramtsstudierenden und -lehrkräften wirksam instruktional und unter Berücksichtigung geeigneter digitaler Medien unterstützt werden können, um die Schwierigkeiten hinsichtlich des Umgangs mit chemischen Repräsentationen und ihren Modellierungsprozessen vermeiden zu können (vgl. Santos & Arroio, 2016).

4 Lehren und Lernen mit digitalen Medien

Durch die zunehmende Digitalisierung von Schule und Unterricht bietet es sich an, digitale Medien als Fördermaßnahme im naturwissenschaftlichen Unterricht in die fachspezifische Lehrerbildung und –fortbildung zu integrieren (Forschungsgruppe digitaler Campus Bayern, 2017). Digitale Medien sind aus unserer Alltags- und Berufswelt nicht mehr wegzudenken (Fischer et al., 2015; Fleischer et al., 2019; Huwer et al., 2021; Lewalter & Walper, 2020; Nerdel

& Kotzebue, 2020). Dabei sind sie vor allem im schulischen Kontext als Lehr- und Lernwerkzeug sowie als künftige Arbeitsmedien in naturwissenschaftlich-technischen Berufsfeldern unerlässlich (vgl. Nerdel & Kotzebue, 2020). Ihr Einsatz im Unterricht erstreckt sich über eine technische Entwicklung, ausgehend von sperrigen, ortsgebundenen Geräten in sogenannten „Computerräumen“, über Notebooks, Whiteboards, Tablets, Smartphones oder (lokal installierten) Softwareprogrammen, web-based Trainings, der WLAN-Technologie bis hin zu Apps auf mobilen Endgeräten mit neuartigen Funktionen und innovativen High-End-Produkten wie VR- oder AR-Brillen (vgl. Huwer & Banerji, 2020; Krause & Eilks, 2015; Lewalter & Walper, 2020; Nerdel & Kotzebue, 2020). Kuhn et al. (2017) erklären, dass Computer laut ICIL-Studie im deutschen Schulunterricht (Eichelmann et al., 2012) wenig Einzug genommen haben, jedoch das Tablet nach und nach stärker im Unterricht implementiert wurde. Ferner wurden zunehmend die Möglichkeiten des *Bring-Your-Own-Device*, wie private Smartphones, auch im Schulalltag ausgeschöpft, wobei die Geräte tendenziell als Notebook-Ersatz, beispielsweise für Rechenzwecke, verwendet wurden (Kuhn et al., 2017). Wenn man ihr umfangreiches Spektrum an Programmen und Funktionen betrachtet, wird ersichtlich, dass Tablets oder Smartphones aber weitaus mehr Potential für das Lehren und Lernen besitzen (vgl. Krause & Eilks, 2014; Miesera et al., 2018). Bildschirmansichten können über eine drahtlose Verbindung direkt über den Beamer geteilt werden (z.B. iPad/ iPhone und Apple TV). Zudem ist die interaktive Bewegung von digitalen Elementen über den Touchscreen und ihre handschriftliche Kommentierung mittels Stift möglich (Krause & Eilks, 2014). Zwar gleicht ihre Haptik derer von Smartboards, sie können aber als portable Werkzeuge mit ihrer gesamten Arbeitsfläche durch das Klassenzimmer, Schulgebäude sowie an andere Lehr- und Lernorte bis nach Hause getragen und, beispielsweise durch die Kamerafunktion und den darauf befindlichen Applikationen (Apps) oder dem Internetzugang, mit neuen Inhalten versehen werden (Scheiter, 2021; Scheiter & Eitel, 2015). Krause und Eilks (2014) betonen in diesem Zusammenhang die Möglichkeiten digitaler Medien verschiedene Sequenzen und Phasen des Chemieunterrichts lernwirksam zu unterstützen. Bei gezielter Verwendung von selbstgesteuerten, kooperativen Lernumgebungen können sie äußerst lernwirksam sein (Nerdel & Kotzebue, 2020; Hense et al., 2001). Spätestens seit Ausbruch von Covid-19 Anfang des Jahres 2020 wurde der Bedarf digitaler Medien flächendeckend in den Schulen ersichtlich und ihre Rolle als Lehr- und Lernwerkzeug klarer (Eickelmann & Gerick, 2020; Lewalter & Wapner, 2020). Nachdem Mitte März alle Bildungseinrichtungen kurzfristig geschlossen wurden und der Unterricht in Präsenz nicht mehr möglich war, galt es diesen medial und methodisch umzugestalten. Um sich adaptiv den neuen Gegebenheiten zu fügen, wurde sogar der Fernunterricht über Konferenztools wie „IServ“ oder „Microsoft Teams“ implementiert, der mit dem *Distance Learning* vollkommen neue Chancen des Lehrens und Lernens in sich trägt (Henne et al., 2021). Als unerwünschter zusätzlicher Katalysator war die Corona-Pandemie ausschlaggebend für die Umstrukturierung

von synchronen zu asynchronen Unterrichtsformaten, welche vor allem das selbstregulierte Lernen im sogenannten *Homeschooling* ermöglichen sollten (Huwer & Banerji, 2020). Digitale Medien sind daher nicht nur Kommunikationsmittel für den sozialen Austausch, in ihnen steckt das Potential Lehr- und Lernprozesse, methodisch, medial sowie fachdidaktisch nezugestalten (Eickelmann & Gerick, 2020; Henne et al., 2021). Laut Fischer et al. (2015) ist der Einsatz digitaler Medien gewinnbringend, da durch sie fachliche und fächerübergreifende Kompetenzen effektiv gefördert werden können. In der Literatur wird die Rolle digitaler Medien zur Förderung des konstruktivistischen Lernens mit seinen aktiven und reflexiven Lernprozessen immer wieder hervorgehoben (Nerdel & Kotzebue, 2020; Fischer et al., 2015). Entsprechend steht ihre Bedeutung und Relevanz für das Lehren und Lernen im naturwissenschaftlichen Unterricht seit längerer Zeit im Zentrum der interdisziplinären Bildungsforschung (Gräsel et al., 2000; Reinmann et al., 2014). Dadurch, dass die Schüler ohnehin mit Smartphones und Tablets in ihrem Alltag vertraut sind, wird ihnen auch eine potentielle Lernwirksamkeit im Fachunterricht zugeschrieben (vgl. West & Vosloo, 2013; Kuhn et al., 2019; Häußler et al., 2015). Digitalen Medien liegt eine Authentizität, bezogen auf die Lerninhalte und das Lernmedium selbst, zugrunde, die sich lernwirksam auf die Leistung und Motivation von Schülern auswirken kann (Kuhn et al., 2017; Kuhn & Vogt, 2015). In Anlehnung an Ryan und Deci (2000) sollte der selbstgesteuerte Umgang mit digitalen Medien zu einem erhöhten Autonomieerleben führen (vgl. Kuhn et al., 2017). Durch das Tablet oder Smartphone können nämlich Bewegungsvorgänge oder Experimente mittels Videoaufzeichnung festgehalten und anschließend mit diversen Apps auf dem gleichen Endgerät unmittelbar bzw. verarbeitet oder ausgewertet werden. Angesichts dessen betonen Kuhn et al. (2017) die Nützlichkeit der integrierten Zeitlupen- und Zeitrafferoption, da durch sie ein naturwissenschaftliches Phänomen analysiert und die Erkenntnisgewinnung initiiert werden kann. Neuartige Techniken wie die zur automatischen Messwerterfassung oder Datenauswertung von Experimenten werden mittlerweile als Kernelement naturwissenschaftlicher Denk- und Arbeitsweisen angesehen (Nerdel & Kotzebue, 2020). Ferner bieten digitale Medien den Lernenden die Möglichkeit multiple Repräsentationen, beispielsweise in Form von automatischen Wertetabellen oder Diagrammen zur Darstellung von Messwertdaten, bereitzustellen und zu elaborieren. Vor allem mittels digitaler (M)ER, können abstrakte naturwissenschaftliche Konzepte und Phänomene abgebildet werden (Lund et al., 2014; Nerdel & Kotzebue, 2020). Es steht nicht nur die technische Aufbereitung, sondern auch die Modalität der Repräsentationen im Vordergrund, welche vor allem durch den Seh- und Hörsinn erfasst werden kann (Mayer, 2014; Nerdel & Kotzebue, 2020). Entsprechend liefern digitale Medien gute Voraussetzungen, um das Verständnis naturwissenschaftlicher Konzepte und in diesem Zusammenhang den Umgang mit der naturwissenschaftlichen Fachsprache gewinnbringend zu unterstützen (vgl. Ainsworth, 2006; Mayer, 2002 nach Kuhn et al.,

2017; Huwer et al., 2019). Dabei wird den digitalen haptischen Modellen, z.B. für die Veranschaulichung von Molekülen oder Organen, der größte Lerneffekt zugesprochen (Bivall et al., 2011; Höffler & Leutner, 2007; Huk, 2006). Bereits Goldkuhle (1993) erkannte, dass für die Modellbildung Computer zu schnelleren und einfacheren Lösungen führen können. Zudem zeigen sich Videos, Animationen und Simulationen erfolgsversprechend für das Lehren und Lernen, da sie auditiv und visuell verarbeitet werden können und eine Interaktivität des Lernenden mit dem Lernmaterial erlauben (Kuhn et al., 2017; Al-Balushi & Al-Hajri, 2014; Mayer & Moreno, 2002). Zahlreiche Forschungen untersuchen in Hinblick auf die Gestaltungsmerkmale digitaler Lernszenarien, inwiefern statische oder dynamische (M)ER in Videos usw. mit und ohne Tonspuren sowie AR- oder VR-Lernumgebungen, wie zum Beispiel virtuelle Lehr- und Lernlabore, die orts- und zeitunabhängige Informationsentnahme und kognitive Verarbeitung, das Kooperationsverhalten oder auch das mobile Lernen im naturwissenschaftlichen Unterricht bereichern können (z.B. Zacharia et al., 2015; Ibáñez & Delgado-Kloos, 2018; Peeters et al., 2023). Nerdel und Kotzebue (2020) fassen zusammen, dass die Untersuchungen von Wirkungsweisen multimedialer Repräsentationen (vgl. Kapitel 3.1) zur Gestaltung von Unterrichtsmaterialien auf kognitionspsychologischer Ebene (Mayer, 2014b; Schnotz, 2014) über die instruktionale Unterstützung in komplexen Lernumgebungen bezogen auf den *Cognitive Load* (Sweller et al., 1998) bis hin zur fachspezifischen und fächerübergreifenden Förderung digitaler Kompetenzen von Schülern im Naturwissenschaftsunterricht (KMK, 2017) sowie der Optimierung des Professionswissens von Lehrpersonen reichen (Forschungsgruppe Lehrerbildung Digitaler Campus Bayern, 2017; Lachner et al., 2020; Zumbach et al., 2020).

4.1 Relevanz digitaler Medien für den Chemieunterricht

Die digitale Mediennutzung spielt heutzutage im naturwissenschaftlichen Unterricht eine immense Rolle (Nerdel & Kotzebue, 2020) und hat den Anspruch fachspezifisch beschrieben zu werden (Härtig et al., 2021). Auch im Unterrichtsfach Chemie wird die Omnipräsenz digitaler Medien und ihrer Vielzahl an didaktischen Einsatzszenarien ersichtlich (Huwer & Banerji, 2020). Nachdem das Internet als unerschöpfliche Quelle eine unfassbare Menge an Informationen in kürzester Zeit zugänglich macht, sind es neben den Chancen auch Risiken, die es dringlichst zu berücksichtigen gilt. Nach Huwer und Banerji (2020) sollte daher, mit Blick auf „Fake-News“ usw., der Einsatz digitaler Medien im Chemieunterricht auch aus fachdidaktischer Perspektive betrachtet werden. Härtig et al. (2021) konstatieren, dass vorrangig die IT-Infrastruktur und insgesamt die Nutzung digitaler Medien an Schulen fokussiert wird, jedoch vor allem die Situation in den einzelnen Fächern anvisiert werden sollte. Demnach müssen insbesondere die fachspezifischen Funktionen digitaler Medien, einschließlich ihrer Lernwerkzeuge wie Apps, hinsichtlich ihrer Lernförderlichkeit im Fach Chemie untersucht werden (vgl. Härtig et al., 2021; Seibert et al., 2020). Bezogen auf das Unterrichtsfach Chemie können digitale Medien als

- Lernwerkzeug zur Initiierung kognitiver Lernprozesse für spezifische Fachinhalte (z.B. Erklärvideo zur Veranschaulichung eines chemischen Phänomens)
- Experimentalwerkzeug, unterstützend im Experimentierprozess, zur Förderung der Erkenntnisgewinnung (z.B. App zur digitalen Messwerterfassung und –auswertung)
- Lernbegleiter zur (mobilen) Organisation und Strukturierung der Lernaktivitäten (z.B. Lernplattform „IServ“)
- Lerngegenstand zur Thematisierung digitaler Funktionen und Möglichkeiten (z.B. Programmierung einer Messstation oder Reflexion der Akku-Technologie)

angesehen werden (Huer & Banerji, 2020). Entsprechend sollte das Fach Chemie - als Teildisziplin der Naturwissenschaften - nicht nur auf Modelle zur Veranschaulichung von Strukturen und Funktionen, wie vorrangig in der Biologie üblich, sondern auch auf (quantitative) Experimente, wie hauptsächlich in der Physik vertreten, zurückgreifen (vgl. Härtig et al., 2020). Innovative Technologien oder animierte Spiele können ebenfalls vielversprechend für den Lernprozess im Fach Chemie genutzt werden (vgl. Al-Balushi & Al-Hajri, 2014). Der digitalgestützte Chemieunterricht fußt demnach unter fachdidaktischen Gesichtspunkten auf zahlreichen medialen Gestaltungsmöglichkeiten. Dabei handelt es sich beispielsweise um Erklär- oder Experimentiervideos (Bruckermann et al., 2022; Hammer & Groß, 2020), Animationen zur Veranschaulichung komplexer, chemischer Sachverhalte und Prozesse auf unterschiedlichen Systemebenen (Berney & Bétrancourt, 2016; Al-Balushi & Al-Hajri, 2014), Simulationen zum Aufbau mentaler Modelle, beispielsweise aus dem Bereich Energie (Peperkorn & Schwedler, 2021), Analyseprogramme wie dem eines Photometers mit geeigneten Sensoren (Edelsbacher, 2022), Messtechniken zur Berechnung des Sauerstoffgehalts beim Experimentieren (Kuhn, 2017), multimediale Baukästen zur Veranschaulichung chemischer Sachverhalte (Schunk & Wich, 2003), Apps zur dreidimensionalen Visualisierung von Molekülstrukturen (Schütz & Lustenberger, 2020) oder digitale Lernumgebungen wie virtuelle Schülerlabore (vgl. Fleischer et al., 2023; Fleischer et al., 2020; Scherp & Schlattmann, 2002). Mit ihnen kann exemplarisch das räumliche Vorstellungsvermögen (Oliver-Hoyo & Babilonia-Rosa, 2017), das naturwissenschaftliche Arbeiten (vgl. Fleischer et al., 2020; Fleischer et al., 2019) oder das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis (Schnitker, 2016; Treagust et al., 2003; Treagust et al., 2004) trainiert werden (Nerdel & Kotzebue, 2020). Dabei kann auf bestehende Anwendungen zurückgegriffen werden, die anschließend didaktisch gerahmt werden. Die digitalen Lernumgebungen können aber auch mit eBooks (Ulrich et al., 2014) oder weiteren interaktiven Techniken wie H5P (Jacob & Centofanti, 2023) von der Lehrkraft bzw. den Schülern selbst konstruiert werden. Die Forschungsergebnisse von Al-Balushi und Al-Hajri (2014) demonstrieren, dass sich authentische, verlässliche und fachdidaktisch adäquate Animationen zur Veranschaulichung der Teilchenebene im Internet finden und als effektives Unterrichtsmaterial das Lernen im Fach Chemie fördern können. Insgesamt sollten digitale Medien zur Modellierung

im Chemieunterricht eingesetzt werden (Wu et al., 2001), um chemische Phänomene und Konzepte auf submikroskopischer Ebene zu veranschaulichen und das Denken in den drei Ebenen nach Johnstone (2000; vgl. Kapitel 2.1) zu erleichtern (Al-Balushi & Al-Hajri, 2014).

(Angehenden) Chemielehrkräften stehen damit unzählige digitale Anwendungen für den eigenen Fachunterricht zur Verfügung (Pfeifer et al., 2002; Romrell et al., 2014). Um sie zu ermutigen, digitale Medien mit ihren Lehr- und Lernwerkzeugen fachdidaktisch reflektiert in den Fachunterricht zu implementieren, wurde das SAMR-Modell als *Framework for Evaluating* entwickelt (Puentedura, 2006; Romrell et al., 2014). Seine vier Ebenen stellen den Nutzen von digitalen Medien im Unterricht hierarchisch dar: (1) *Substitution*: Die Technologie ersetzt eine Lernaktivität mit analogen Medien ohne die Funktionen zu ändern (z.B. Digitale statt analoge Versuchsanleitung im PDF-Format); (2) *Augmentation*: Die Technologie ersetzt eine analoge Lernaktivität mit einer optimierten digitalen Funktionalität (z.B. Interaktives Arbeitsblatt mit Drag- and Drop-Optionen oder Hypertexten); (3) *Modification*: Die Technologie ermöglicht eine Umkonzeptionierung der alten Lernumgebung (z.B. Kollaboratives Erstellen eines eBooks zur Dokumentation eines Versuchsablaufs) und (4) *Redefinition*: Die Technologie ermöglicht die Konzipierung einer Lernumgebung, die ohne diese Technologie nicht möglich gewesen wäre (z.B. Virtueller Unterricht im Sinne des *Distance Learnings* mit Softwareprogrammen wie z.B. „IServ“). Lehrkräfte nutzen digitale Medien vorrangig für Lehrvorträge im Unterricht. Die Qualität des Medieneinsatzes stützt sich demnach hauptsächlich auf der ersten bis zweiten, maximal dritten, Ebene des SAMR-Modells (Sailer et al., 2017). Digitale Lernumgebungen der Stufe 4 (*Redefinition*) finden in der Praxis kaum Anwendung. Nerdel und Kotzebue (2020) sowie Härtig et al. (2021) bestätigen, dass digitale Medien, trotz ihrer diversen Einsatzmöglichkeiten und einiger konkreter Vorschläge von Seiten der Fachdidaktik, als Lern- oder Experimentalwerkzeuge im (Chemie-) Unterricht kaum implementiert werden (Härtig et al., 2020). Vorrangig werden Präsentation und selten Dokumentationen bzw. Produktionen angefertigt (Gräsel, 2000; Sailer et al., 2017; Fischer et al., 2015; Vogelsang et al., 2019). Die Kompetenzerwartungen an Schüler und Lehrkräfte gehen jedoch weit über die bloße Substitution und das reine Präsentieren mittels Datenverarbeitungsprogrammen wie „Microsoft PowerPoint“ hinaus (vgl. Drossel et al., 2019).

4.2 Kompetenzerwartungen im Klassenzimmer

Die Frage „Ob digitale Medien in den Fachunterricht eingesetzt werden können bzw. sollen?“ wurde von dem Bildungsauftrag, diese einzubinden, abgelöst. Entsprechend rücken digitale Kompetenzen nicht nur im Alltag, sondern auch in der modernen Arbeitswelt und insbesondere im schulischen Kontext in den Vordergrund (Lachmann et al., 2022; Fischer et al., 2015). Laut Eickelmann und Gerick (2020) sollte sich das Lehren und Lernen mit digitalen Medien auf vier Zielperspektiven stützen: 1) Fertigkeiten im Umgang mit digitalen Medien vermitteln, 2) Fachliches Lernen durch digitale Medien fördern, 3) Neue Formen des Lehrens und Lernens mit

digitalen Medien entwickeln und implementieren sowie 4) Medienkompetenzerwerb fördern (Eickelmann & Gerick, 2020). Entsprechend fordert der digitale Unterricht geeignete digitale Unterrichtsmaterialien für die jeweiligen Fächer, mit welchen der Rahmen für ein fachdidaktisch adäquates Lernen geschaffen wird. Ferner sind es spezifische, medienbezogene Kompetenzen, die es nicht nur vonseiten der Lernenden, sondern auch von den Lehrenden zu erlangen gilt (Lewalter & Walper, 2020).

4.2.1 Kompetenzen in der digitalen Welt

Mit dem Digitalpakt Schule von Bund und Ländern wurde im Jahr 2019 auf den Bedarf und die Potenziale digitaler Bildung reagiert und die Grundlage für einen breiteren Medieneinsatz im Unterricht geschaffen (Lewalter & Walper, 2020). Das Landesmedienzentrum Bayern (MEBIS; s. ISB, 2017) listet verschiedene Kompetenzbereiche zum Umgang mit digitalen Medien auf, die Schüler neben den fachlichen und prozessbezogenen Fähigkeiten und Fertigkeiten erwerben sollen (DigitUS, 2022). Zudem macht die Veröffentlichung der „Kompetenzen in der digitalen Welt“ durch die KMK (2017) den Bildungsauftrag klarer denn je und stellt sicher, dass die Digitalisierung flächendeckend alle Schulfächer erreicht (Huwer & Banerji, 2020). Verantwortlich für die Qualitätssicherung ist die gesamte Schulgemeinschaft. Sie sollte das Ziel verfolgen die Lernenden bei der Entfaltung ihrer digitalen Kompetenzen zu unterstützen (Sailer et al., 2017; KMK, 2017; Huwer & Banerji, 2020). Dabei kann zwischen sechs Kompetenzbereichen differenziert werden (vgl. KMK, 2017):

- I. **Suchen, Verarbeiten und Aufbewahren** (z.B. Recherche und Auswahl von fachspezifischen Informationen zur Klärung eines chemischen Sachverhaltens durch kritische Reflexion der verschiedenen Informationen aus unterschiedlichen Quellen.)
- II. **Kommunizieren und Kooperieren** (z.B. Kommunikation, Umgang und Zusammenarbeit mit verschiedenen digitalen Werkzeugen wie beispielsweise dem eBook zur Erstellung eines Lerntagebuchs; neben der Medienauswahl und dem Wissen über technische Funktionen müssen unter anderem Verhaltensregeln zur Kommunikation berücksichtigt werden.)
- III. **Produzieren und Präsentieren** (z.B. Auf Basis diverser bekannter Lernwerkzeuge sollen Materialien, exemplarisch ein Portfolio zur Versuchsplanung, -durchführung und -auswertung mit Texten, Videos und Tonspuren usw., erstellt, präsentiert und mit der Klasse geteilt sowie weiterverarbeitet werden; dabei sind unter anderem Aspekte wie Urheber- und Nutzungsrechte zu beachten.)
- IV. **Schützen und sicher Agieren** (z.B. Sicher in digitalen Lernumgebungen handeln und sich den Risiken und Gefahren bewusst sein, vor allem mit Blick auf die Allgegenwärtigkeit digitaler Medien und ihren Suchtgefahren sowie dem unmittelbaren Zugriff zahlreicher Informationen aus dem Internet; Strategien zum Umgang mit digitalen Medien

sollen erkannt und angewandt werden, exemplarisch die Aktualisierung der Sicherheitseinstellungen für Datenschutz und –sicherheit.)

- V. **Problemlösen und Handeln** (z.B. Technische Probleme identifizieren und Lösungen entwickeln sowie diverse Werkzeuge situationsgerecht und kreativ zum Lernen, Arbeiten und Problemlösen verwenden, exemplarisch die Kamerafunktion zur Prozessdokumentationen mit anschließender Integration der Aufnahmen in entsprechende Text- und Bildverarbeitungsprogramme; dabei sollten auch eigene Defizite bei der Nutzung digitaler Werkzeuge erkannt bzw. ermittelt und Strategien zur Beseitigung entwickelt werden; auch Algorithmen sind zu erkennen und formulieren.)
- VI. **Analysieren und Reflektieren** (z.B. Digitale Medien und ihre Werkzeuge sollen aus unterschiedlichen Perspektiven wie Gestaltung oder Wirkung verstanden, erkannt und beurteilt werden; Chancen und Risiken des Mediengebrauchs sollen für die verschiedensten Lebensbereiche reflektiert werden, unter anderem vor dem Hintergrund von Geschäftsaktivitäten oder der politischen Meinungsbildung und Entscheidungsfindung.)

Die Kompetenzen sollen, gemäß der KMK (2017), nicht nur in einem Fachcurriculum gesondert verankert werden. Sie sollen vielmehr integrativ in die bestehenden Fachcurricula eingebunden und im jeweiligen Fachunterricht umgesetzt werden. Wohingegen das „Suchen, Verarbeiten und Aufbewahren“ Basiskompetenzen umfasst oder das „Schützen und sicher Agieren“ tendenziell allgemeingültige Aspekte für den sicheren und verantwortungsbewussten Umgang mit Medien fokussiert, sollten die Teilkompetenzen „Kommunizieren und Kooperieren“, „Produzieren und Präsentieren“ sowie „Problemlösen und Handeln“ in ihrer besonderen Funktion für den Chemieunterricht begutachtet werden. Die Vorteile digitaler Lernumgebungen können ausgeschöpft werden, wenn diese, orientiert am Chemiecurriculum, Lehr- und Lernprozesse systematisch fördern (KMK, 2017; Lewalter & Walper, 2020). Beispielsweise können Lernsoftwares spielerisch das *Forschende Lernen* fördern, wenn chemische Experimente simuliert und durch Eingriff der Schüler Variablen für Ursache-Wirkungsanalysen verändert werden (vgl. Nerdel & Kotzebue, 2020). Mind- oder Concept-Maps können Strukturen liefern, wie verschiedene Themen zusammenhängen (z.B. Einteilung der Stoffe mittels diverser Repräsentationen), und stetig mit weiteren Inhalten ausgebaut werden. Darüber hinaus erleichtern digitale Medien die Organisation und Zusammenarbeit, indem beispielsweise kollaborative Arbeitsstrukturen ermöglicht werden (vgl. Nerdel & Kotzebue, 2020). Mittels digitaler Quizze können Lernstrategien angewandt und diverse Lernaktivitäten gefördert werden, exemplarisch wenn der Aufbau des Periodensystems durch geeignete Apps wie „Kahoot“ trainiert wird (vgl. Chi, 2006). Im Zuge des naturwissenschaftlichen Arbeitens können digitale Medien und ihre Werkzeuge als Lernutensilien für das Denken in den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) genutzt werden. Hierfür sollen die Schüler das Potential der digitalen Lernszenarien

erkennen, geeignete Werkzeuge für den Wissensaufbau im Fach Chemie auswählen und diese für bestimmte chemische Sachverhalte, unter anderem beim Experimentieren, anwenden. Dies schließt insbesondere auch die selbstbestimmte, -gesteuerte und -organisierte Erstellung digitaler Portfolios, Lerntagebücher, Inhaltszusammenfassungen, Visualisierungen von Molekülstrukturen, Versuchsbeschreibungen und -auswertungen usw. ein (Hartmut, 2004). Es sollte das Ziel verfolgt werden, dass Lernende unter Zuhilfenahme geeigneter digitaler Medien, selbstreguliert sowie kooperativ, chemische Phänomene auf Stoffebene durch Modelle auf Teilchenebene veranschaulichen und erklären (vgl. Eickelmann & Gerick, 2020). Dabei knüpfen die digitalen Lernszenarien an den fachlichen Vorerfahrungen der Schüler an (vgl. Häußler et al., 2015) und berücksichtigen Gestaltungskriterien (vgl. Kapitel 3.3), sodass ausreichend kognitive Ressourcen für ertragreiche Lernprozesse im Fach Chemie bereitgestellt werden können (vgl. Nerdel & Kotzebue, 2020). Aus technischer und didaktischer Perspektive ist es einerseits die Medienkompetenz per se, die es an Beispielen aus der Chemie zu fördern gilt. Andererseits soll die Verzahnung der digitalen mit den fachbezogenen Kompetenzen den Wissenserwerb chemischer Konzepte und Arbeitsweisen durch den Einsatz geeigneter digitaler Medien zielgerichtet und gewinnbringend unterstützen (vgl. Nerdel & Kotzebue, 2020; Fischer et al., 2015).

4.2.2 Professionswissen von (angehenden) Lehrkräften

Mit der voranschreitenden technischen Entwicklung steigen zweifelsfrei die Anforderungen bei den Schülern an. Jedoch ist der Einsatz digitaler Medien im Fachunterricht kein „Selbstläufer“, der grundsätzlich zu besseren Lernerfolgen führt (Huwer et al., 2021). Empirische Forschungen zeigten schon früh, dass es bei der Konstruktion von Wissen nicht um die Quantität, sondern die Qualität der medialen Darstellung geht (Gräsel, 1997). Erst die reflektierte fach- und mediendidaktische Rahmung des (digitalgestützten) Unterrichts führt zu positiven Lernleistungen (vgl. Nerdel & Kotzebue, 2020). Dabei reicht es nicht aus, getreu des SAMR-Modells nach (Puentedura, 2006), rein auf der Ebene der Substitution analoge Unterrichtsmaterialien wie Arbeitsblätter in digitale Formate wie PDF-Dokumente umzugestalten. Vielmehr sollten innovative Lernarrangements genutzt werden, um kognitive Modellierungsprozesse zu initiieren, diverse Lernaktivitäten zu unterstützen und insgesamt naturwissenschaftliche Denk- und Arbeitsweisen zu fördern (Fischer et al., 2015), welche aufgrund eines hohen inhaltlichen Komplexitätsgrads oder mangelnder repräsentativer Möglichkeiten im Analogen per se schwer lern- und lehrbar sind. Es handelt sich um eine fachbezogene und fächerübergreifende Medienkompetenz zur Verwendung und Reflexion digitaler Medien, die es zu vermitteln gilt. Infolgedessen stehen Chemielehrkräften vollkommen neue Chancen zur Verfügung ihren Fachunterricht zu gestalten. Dabei müssen sie aber auch gewisse Anforderungen erfüllen, wenn es um die Implementierung digitaler Unterrichtskonzepte geht (Nerdel & Kotzebue, 2020; Sailer et al., 2017). Forschungen bei Lehramtsstudierenden demonstrieren, dass diese weder zur

Schulzeit noch während des Studiums aktiv auf digitale Medien zurückgegriffen haben (Vogel-sang et al., 2019). Obwohl Lehrkräfte aus dem MINT-Bereich digitale Anwendungen häufiger in ihren Fachunterricht einbinden als Nicht-MINT-Lehrkräfte (Lorenz et al., 2017), wird das Lehr- und Lernpotential dieser bisweilen nicht vollkommen ausgeschöpft (vgl. Drossel et al., 2019) und scheint die Lernenden unzureichend in ihren Lernaktivitäten zu unterstützen (Zydney & Warner, 2016, Nerdel & Kotzebue, 2020). Internationale Studien zeigen zudem, dass die Teilnahme an mediendidaktischen Lehrerfortbildungen ausbaufähig ist (Fischer et al., 2015). Da Lehrpersonen in einer digitalgeprägten Welt dringlich Qualifikationen im Umgang mit neuen (innovativen) Technologien erlangen sollen (Lachner et al., 2020), wurden mehrere Kompetenzrahmen entwickelt, die das Professionswissen von Lehrkräften zeitgemäß abbilden:

TPACK-Modell. Das professionelle Wissen von Lehrkräften aus dem naturwissenschaftlichen Bereich ließ sich vor geraumer Zeit noch in die drei Dimensionen *Fachwissen* (engl. *Content Knowledge, CK*), *Pädagogisches Wissen* (engl. *Pedagogical Knowledge, PK*) und *Fachdidaktisches Wissen* (engl. *Pedagogical Content Knowledge, PCK*) untergliedern (Tepner et al., 2012). Dabei stützt sich das Fachwissen im Chemieunterricht auf fundierte Wissensinhalte rund um das Fach Chemie, die Konzepte und Phänomene auf Stoff- und Teilchenebene mit ihren Arbeits- und Denkweisen beinhalten. Ferner geht das im Schulunterricht zu lehrende Wissen über die schulischen Lehr- und Lerninhalte hinaus und umfasst auch komplexe wissenschaftliche Sachverhalte mit ihren anspruchsvollen Sinnzusammenhängen (vgl. Tepner et al., 2012). Fachwissen ist eine notwendige Voraussetzung, um inhaltliche Schwerpunktsetzungen vorzunehmen (vgl. Nerdel & Kotzebue, 2020). Das pädagogische Wissen ist gekennzeichnet von unterrichtsbezogenen, allgemeingültigen Wissensinhalten und Fähigkeiten, die keinen Fachbezug aufweisen (Grossman, 1990). Tepner et al. (2012) verweisen hierfür auf die Faktoren „Klassenführung“, „Unterrichtsmethoden“, „individuelle Lernprozesse“ und „Leistungsbeurteilungen“. Werden die beiden Teilkompetenzen *Fachwissen* und *Pädagogisches Wissen* miteinander verknüpft, so handelt es sich um das *Fachdidaktische Wissen* (vgl. Shulman, 1987). Charakteristisch für diese Dimension ist das Wissen darüber, wie gewisse Sachverhalte zur Förderung der fachlichen und prozessbezogenen Kompetenzen von Schülern unter Berücksichtigung ihrer Präkonzepte aufbereitet und erklärt werden können. Entsprechend schließt dieses Wissen die Schülerkognition und Aufgabengestaltung sowie fachspezifische Instruktions- und Vermittlungsstrategien ein (Tepner et al., 2012; Kotzebue & Nerdel, 2012). Werden nun die allgegenwärtigen technologischen Entwicklungen in Schule und Unterricht, vor allem in Hinblick auf die von der KMK (2017) festgesetzten „Kompetenzen in der digitalen Welt“ beachtet, so ist die zusätzliche Fokussierung auf die technischen Fähigkeiten und Fertigkeiten von Lehrpersonen mehr als einleuchtend. Entsprechend wurden ihre Kompetenzerwartungen um die technische Komponente erweitert (Borowski et al., 2010; Valtonen et al., 2015; Koehler

& Mishra, 2009). Jede der drei Komponenten CK, PK und PCK beinhaltet nun auch die technische Dimension und wird folglich zu TCK, TPK, PCK ausgebaut, welche zusammen das *Technisch-pädagogische-fachinhaltliche* Wissen (engl. *Technological Pedagogical Content Knowledge, TPACK*) bilden (vgl. Abbildung 7):

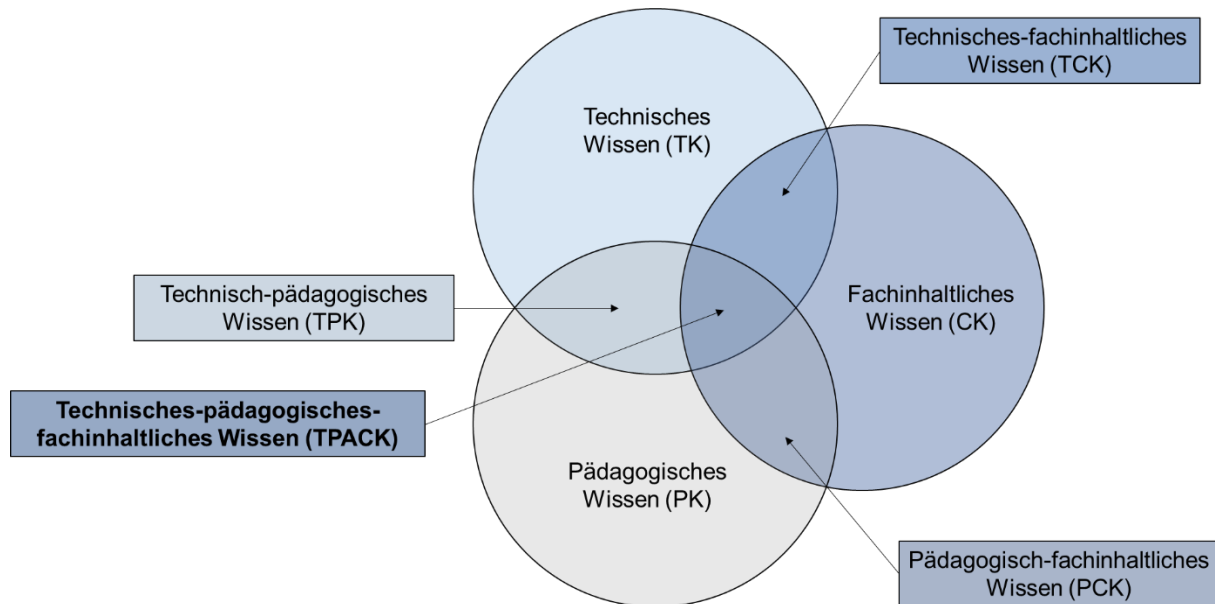


Abbildung 7. TPACK-Modell (orientiert an Harris & Hofer, 2011; in Anlehnung an Köhler & Mishra, 2009).

Die Kenntnisbereiche können, in Anlehnung an Shulman (1986), Baumert und Kunter (2006) sowie Tepner et al. (2012) einerseits fächerübergreifend (TK, TPK) und andererseits fachspezifisch (TCK, TPACK) eingeordnet werden (Koehler & Mishra, 2009). Laut Koehler et al. (2014) kann TPACK ausgehend vom fachdidaktischen Wissen entwickelt werden, indem es auf technische Szenarien übertragen wird. Demzufolge liegen dem technisch-fachinhaltlichem Wissen (TCK) Kenntnisse über fachbezogene Technologien sowie der gegenseitigen Wirkung von Technologie und Fachwissen zugrunde (vgl. Nerdel & Kotzebue, 2020). Durch die Einbindung der pädagogischen Komponente in das TCK lässt sich TPACK ableiten, welches als medienbezogenes fachdidaktisches Wissen die Kenntnis von fachdidaktischen Konzeptionen beinhaltet und durch die Implementierung digitaler Medien im Chemieunterricht umgesetzt werden kann. Es wird ein exemplarisches Unterrichtsszenario für das Fach Chemie angeführt, welches die Erweiterung von PCK um die technische Komponente demonstriert:

Soll der Versuch zur Elektrolyse von Zinkiodid im Chemieunterricht in Partnerarbeit durchgeführt werden, könnte die Lehrkraft „klassisch“ den Schülern, orientiert an deren Präkonzepten, ein fachdidaktisch ausgereiftes analoges Arbeitsblatt mit Versuchsanleitung aushändigen, wobei gestützte Hilfekarten im Papierformat am Pult zur Verfügung stehen und das selbstregulierte Lernen der Schüler unterstützen. Mit Blick auf das TPACK-Modell ist es nun denkbar, das Lernszenario durch Einbinden technischer Funktionen pädagogisch, fach- und mediendidaktisch zu modifizieren. Digitale Medien könnten unterstützend auf den Lernprozess der

Schüler wirken, wenn das analoge Arbeitsblatt mit digitalen Hilfekarten ergänzt wird. Beispielsweise könnten die Hilfen als QR-Codes an entsprechender Stelle auf der Versuchsanleitung angebracht und mittels Smartphone selbstgesteuert von den Schülern aufgerufen werden. Dabei erzeugt die exakte Positionierung der QR-Hilfen auf dem Arbeitsblatt, bezogen auf die repräsentative Ebene, ein höheres Maß an Kontiguität in dem Lernmaterial (vgl. Mayer, 2002, 2014). Ferner wird im Sinne des *Classroom Managements* eine ruhigere Arbeitsatmosphäre mit weniger Störfaktoren geschaffen, da die Schüler ihren Arbeitsplatz nicht verlassen müssen.

Abgrenzung des TPACK-Modells zu anderen Kompetenzrahmen

K19+ - Modell. Auch die Forschungsgruppe Lehrerbildung Digitaler Campus Bayern (2017) ging der Frage nach, welche digitalen Kompetenzen Lehrkräfte für das Unterrichten benötigen und entwickelte für deren Beantwortung das Rahmenkonzept „Kernkompetenzen von Lehrkräften für das Unterrichten in einer digitalisierten Welt“. Dabei werden 19 medienbezogene Lehrkompetenzen angeführt, die professionsspezifisch auf Bildungs- und Erziehungsaufgaben im Fachunterricht abzielen. Das „+“ symbolisiert die zusätzliche Erweiterung des Modells um persönliche Medienkompetenzen (K19+), welche alle digital mündigen Bürger besitzen sollten und folglich im Unterricht zu thematisieren sind (*K19+ - Rahmenmodell Der Kernkompetenzen*, 2023; Sailer et al., 2017). Zudem berücksichtigt das K19+ - Modell zwei Komponenten: Die Wissenskomponente stützt sich auf die technologischen Bereiche des TPACK-Modells und die Handlungskomponente schließt das professionelle unterrichtliche Handeln in den vier Phasen *Planung, Realisierung, Evaluation des digitalen Unterrichts* und *anschließende Kommunikation (Sharing)* ein (Kotzebue, 2022; Nerdel & Kotzebue, 2020).

DPACK-Modell. Das DPACK-Modell setzt sich nicht nur mit der Technologie per se, wie im TPACK-Modell beschrieben, auseinander, sondern konzentriert sich unter anderem auf die Digitalität (Huer et al., 2019). Hinsichtlich des individuellen und gesellschaftlichen digitalen Wandels werden die Komponenten zu einem pädagogischen und fachinhaltlichen Wissen (DPCK) aufsummiert, das sich auf die Digitalität bezieht und das Fundament für die fach- und mediendidaktisch reflektierte Unterrichtsgestaltung mit Technologien bildet (vgl. Stalder, 2016, 2018). Laut Huer et al. (2019) kann das technologische Wissen allein die Kompetenzerwartungen an Lehrkräfte nicht umfassend abbilden. Die Fachdidaktiker argumentieren, dass die kommunikativen Potentiale der Digitalität ins Zentrum rücken und Problemlösungen sowie verantwortungsbewusste Entscheidungsfindungen, auf Basis ausgiebiger Reflexionen, im alltäglichen Leben das technische Fachwissen übersteigen. Exemplarisch können Social-Media-Kanäle wie Instagram o.ä. angeführt werden, die die Meinungsbildung junger Menschen maßgeblich prägen und fehlerbehaftete Präkonzepte erzeugen können (z.B. zur Ernährung). Derartige Veränderungsprozesse dürfen in der Fachdidaktik nicht vernachlässigt werden, viel-

mehr sollten sie wahrgenommen und diskutiert werden. Sie basieren auf Problemen und Risiken vor dem Hintergrund technischer Lösungen und Entwicklungen, welche auf Kommunikationssysteme in sozialen und kulturellen Lebensbereichen zurückzuführen sind. Entsprechend wurde das TPACK-Modell um die Komponente der Digitalität erweitert, indem es bezogen auf diese die Potentiale der kommunikativen Praxis für das Lehren und Lernen im Fachunterricht fokussiert und sich fachdidaktisch zu Nutze macht (Huwer et al., 2019). Folglich soll das Modell einerseits als Grundlage für die interdisziplinäre Vernetzung zwischen den MINT-Fachdidaktiken dienen und einen Austausch mit der Medienpädagogik und den Bildungswissenschaften ermöglichen. Andererseits kann es als Orientierung für die praxisorientierte Forschung zum Professionswissen von MINT-Lehrkräften, einschließlich ihrer Analysekompetenzen, genutzt werden (Huwer et al., 2019).

DigCompEdu (Bavaria). Der DigCompEdu – Kompetenzrahmen soll überfachlich die verschiedenen digitalen und medienbezogenen Kompetenzen von Lehrkräften, die sie für die Umsetzung ihres Bildungs- und Erziehungsauftrags in der digital geprägten Welt benötigen, beschreiben und systematisieren. Dabei werden alle Phasen der Aus- und Fortbildung berücksichtigt. Entsprechend werden Lehrpersonen bei der selbstreflexiven Einschätzung ihrer Fähigkeiten und dem Feststellen von Fortbildungsbedarfen unterstützt. Zudem sollen durch den DigCompEdu Fortbildungsangebote initiiert und veröffentlicht werden (Redecker, 2017). Auf Basis des DigCompEdu wurde der Kompetenzrahmen für das Bundesland Bayern zum DigCompEdu Bavaria weiterentwickelt, der sich in sechs fachunabhängige Kompetenzbereiche mit insgesamt 22 Teilkompetenzen gliedert (Redecker, 2017; ISB, 2017). Diese Kompetenzen sind wesentlich detailreicher und differenzieren das TPACK-Modell aus. Laut KMK (2017) sollen Lehrkräfte digitale und medienbezogene Lehrkompetenzen erwerben, verstetigen und reflektieren sowie ihren digitalen Fachunterricht und die Kooperation in der Schule zeitgemäß ausbauen und optimieren. Für Schulleitungen und die Bildungsadministration ist der Rahmen als Orientierung nützlich.

DiKoLAN. Zu guter Letzt wird der Orientierungsrahmen „Digitale Kompetenzen für das Lehramt in den Naturwissenschaften (DiKoLAN)“ vorgestellt. Ausgehend von den oben angeführten Rahmenwerken wie TPACK, DigCompEdu usw. subsumiert DiKoLAN digitale Kompetenzen von Lehramtsstudierenden, welche die Planung und Umsetzung des digitalgestützten Naturwissenschaftsunterrichts bedingen (Becker et al., 2020; Kotzebue et al., 2021). Die Digitalisierung fußt auf einer dynamischen und schnelllebigen Weiterentwicklung der Naturwissenschaften, die sich wiederum auf das Unterrichten auswirkt und für (angehende) Lehrkräfte herausfordernd sein kann. Folglich wurden mit DiKoLAN Standards für die Lehrerbildung gearbeitet, die sich mit den bestehenden Fachcurricula verzahnen. Es wurden Basiskompetenzen formuliert, auf deren Grundlage eine Erweiterung und der Anschluss an Fach- bzw. Bil-

derungswissenschaften sowie die zweite Phase der Lehrerbildung möglich ist. Das Rahmenmodell umfasst zum einen digitalisierungsbezogenes Wissen und zum anderen methodische Kompetenzen. Darunter fallen vier allgemeine, tendenziell fachunabhängige Teilkompetenzen (z.B. Dokumentation) und drei fachspezifische Teilkompetenzen (z.B. Datenerfassung). DiKoLAN differenziert als erster naturwissenschaftsdidaktischer und praxisorientierter Ansatz das TPACK-Modell domänenspezifisch aus. Es werden Kompetenzbereiche spezifisch für die verschiedenen Naturwissenschaften aufgeschlüsselt sowie allgemeinere Kompetenzbereiche für die interdisziplinäre Vernetzung der Fächer demonstriert. Dabei wird jeder Kompetenzbereich durch Kompetenzerwartungen beschrieben, die sich auf den vier technologiebezogenen Kompetenzbereichen des TPACK-Modells und den drei Leistungsebenen *Benennen*, *Beschreiben* und *Anwenden* stützen (Becker et al., 2020; Kotzebue et al., 2021).

Alle Kompetenzrahmen haben gemein, dass (angehende) Lehrkräfte, an der Schnittstelle von fachdidaktischem und technologischem Wissen, auch mediendidaktische Kompetenzen zur Vervollständigung ihres Professionswissens erwerben müssen (Sailer et al., 2017). Unterrichtsqualität kann nur dann sichergestellt werden, wenn das fachliche und didaktische Wissen, beispielsweise im Fach Chemie zum Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis, naturwissenschaftlichen Modellieren und der chemischen Fachsprache (s. Kapitel 1 bis 3), zusammen mit der Fach- und Mediendidaktik, unter Berücksichtigung aktueller technischer Entwicklungen, die Grundlage für die Unterrichtskonzeptionierung bildet (vgl. Farida, 2009; Köhler & Mishra, 2009). Dabei sollten aber bestehende Lernprinzipien, die bisher mit analogen Medien instruktional unterstützt wurden, nicht verworfen, sondern – wenn möglich – durch innovative Techniken optimiert werden (vgl. Döring, 1997). Die Ausführungen verdeutlichen, dass das TPACK-Modell nach Koehler und Mishra (2009) die fundamentale Basis für weitere Entwicklungen von Rahmenmodellen darstellt. Auch in der vorliegenden Arbeit wird auf diese Evidenz zurückgegriffen. Da der Schwerpunkt dieser Dissertationsarbeit nicht auf der Erfassung von medienbezogenen Kompetenzen liegt und eine untergeordnete Rolle spielt, jedoch nicht vernachlässigt werden sollte, ist eine Ausdifferenzierung des TPACK-Modells wie bei DPACK oder DiKoLAN nicht nötig.

4.3 Digitale Lernwerkzeuge zur Förderung des Stoff-Teilchen-Konzeptverständnisses

Werden lehrplanrelevante Fachinhalte mittels digitaler Medien von der Lehrkraft multimedial aufbereitet und in ein fachdidaktisch angemessenes Konzept eingebettet, können die Lernprozesse der Schüler durch diese neuen Möglichkeiten der Kommunikation und Kooperation erfolgsversprechend gefördert werden (Girwidz, 2015). Zahlreiche Untersuchungen stützen sich auf dem fach- und mediendidaktischen Mehrwert von digitalen Medien, wie zum Beispiel bei

Animationen, und bestätigen immer wieder, dass diese ein großes Potenzial für das multimediale Lernen besitzen (Mayer & Moreno, 1998, 2002a, 2002b; Sweller, 2011). Aus fachwissenschaftlicher Perspektive sollte sich ein Nutzen aus diesem technischen Fortschritt und ihren Erneuerungen vor allem dann ergeben, wenn Prozesse, die visuell mit dem bloßen Auge nicht wahrnehmbar sind, mit digitalen Soft- und Hardwaresysteme simultan auf Stoff- und Teilchenebene sichtbar gemacht werden (Farida et al., 2010; Huwer et al., 2019; Huwer et al., 2021). Es ist demnach nur naheliegend auch das Kommunizieren in den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) digital auszubauen und durch die gezielte Einbindung digitaler (M)ER das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis anschlussfähig zu fördern, sodass Verständnisschwierigkeiten beseitigt werden. Schließlich können diverse chemische Darstellungen auf makroskopischer oder submikroskopischer Ebene digitalisiert werden, um die Verständniskonstruktion auf unterschiedliche Art und Weise zu stimulieren (vgl. Al-Balushi, 2012; Stieff, 2011b; Wu et al., 2001). (3D-) Animationen bzw. Simulationen können einen Einblick in die auf Teilchenebene unsichtbaren Prozesse und Strukturen geben und die Konstruktion neuer, mentaler Modelle nach sich ziehen. Laut Landriscina (2009) kann das simulationsbasierte Lernen die kognitive Informationsverarbeitung verändern und die Internalisierung der Erkenntnisse effektiv beeinflussen (vgl. Tasker & Dalton, 2006). Durch die Interaktion zwischen mentalem Modell und Simulations-Modell werden bestehende Schüler (-fehl) -vorstellungen (vgl. Kapitel 2.2.1) als resistente Gedankenkonstrukte des Langzeitgedächtnisses umgewandelt und fördern damit das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis (vgl. Peperkorn & Schwedler, 2021; Suits & Sanger, 2013). Schließlich erlangen Simulationen vor allem durch die Kombination aus statischen und dynamischen (M)ER ihren Stellenwert, da sie interaktiv gesteuert werden und folglich verschiedene Lernaktivitäten initiieren können (vgl. Stieff, 2011a; Sailer et al., 2017). Daher untersuchen die Fachdidaktiken seit geraumer Zeit an spezifischen naturwissenschaftlichen Sachverhalten die Wirksamkeit digitaler Lernszenarien wie Simulationen, Animationen, Videos usw. auf das Denken in den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000). Beispielsweise soll mit dem Unterrichtskonzept „ChemLEVEL“ die Fachsprache auf Grundlage des Johnstone-Dreiecks (1993) gefördert werden. Hierfür wurde eine digitale Lernumgebung zum Thema galvanische Zellen für das Tablet entwickelt (Haas & Marohn, 2022). Die Studienergebnisse der Prä-Post-Befragung bei Schülern der 9. Klasse einer nordrhein-westfälischen Gesamtschule liefern eine erste Tendenz, dass die digitale Konzeption einen fachlichen und fachsprachlichen Lernzuwachs bewirkt (Haas & Marohn, 2022). Ferner befasst sich die chemiedidaktische Forschung mit Animationen, welche konkrete Modelle der organischen Chemie beinhalten und multimediale das Denken in den drei Ebenen (vgl. Johnstone, 2000) fördern sollen. Dabei wurden vor allem aus motivationaler Perspektive positive Effekte gemessen, da der Umgang mit den verschiedenen Strukturmodellen Modellierungsprozesse unterstützen kann (Al-Balushi & Al-Hajri, 2014). Überdies wurde im Zusammenhang mit dem Johnstone-Dreieck an der University of

British Columbia in Okanagan ein Lehrkonzept entwickelt, welches von Chemiestudierenden evaluiert werden sollte. Es handelte sich um ein *Flipped Classroom Modell*, das Lehrvideos mit einer Live-Übertragung des Lehrkörpers vereint und sich inhaltlich auf kommentierten Bildschirmaufnahmen zur symbolischen Ebene, Animationen zu Molekülen auf submikroskopischer Ebene und experimentellen Labordemonstrationen auf makroskopischer Ebene stützt (Petillion & McNeil, 2020). Die Live-Übertragung des Lehrers schaffte eine Nähe zu den Studierenden und das Format, einschließlich der Videogestaltungen, ermöglichte einen fachdidaktisch wertvollen Rahmen, der Aspekte der kognitiven Belastung berücksichtigte. Die Untersuchungsergebnisse demonstrieren eine hohe Zufriedenheit der Studierenden mit dem *Flipped Classroom Modell*. Ferner deuten sie darauf hin, dass die Studierenden durch die interaktiven Fragestellungen in den Videos und den Informationen der Videoausschnitte, die dem Ansatz von Johnstone (1993, 2000) zugrunde lagen, ihr Konzeptverständnis verbesserten (Petillion & McNeil, 2020). Stieff (2011a) beschäftigte sich im Rahmen einer Interventionsstudie mit der Entwicklung und den Auswirkungen von computergestützten Visualisierungswerkzeugen zur Unterstützung der Representational Competence (vgl. Kapitel 3.2) von Schülern im Chemieunterricht. Die Ergebnisse offenbarten positive Effekte, wenn es um die Denkprozesse der Lernenden und ihre Translationen in submikroskopische Darstellungsformen zur Veranschaulichung chemischer Phänomene geht. Das Konzept *Simulation-based Instruction for Mental Modeling in School (SIMMS)* von Peperkorn und Schwedler (2021) soll durch die Elaboration simulationsbasierter Online-Lerneinheiten zur Energetik kognitive Modellierungsprozesse bei Lernenden aktivieren und das Konzeptverständnis zu Stoff- und Teilchenebene optimieren. Obgleich ihre qualitative Forschung durch die Nutzung der Simulation auf eine positive Veränderung der mentalen Modelle und das Denken auf repräsentativer Ebene hinweist, wurden in Einzelfällen auch Fehlvorstellungen festgestellt (Peperkorn & Schwedler, 2021). Techniken zur Teilchenmodellierung im Chemieunterricht wie das Softwareprogramm „Odyssey“ leisten einen Beitrag zum Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis (Schnitker, 2016). Bei realer Versuchsbeobachtung kann das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis mithilfe eines zusätzlichen digitalen Mediums, z.B. Tablet mit Video, gefördert werden (vgl. Schnitker, 2016). Die Ergebnisse weisen jedoch des Öfteren darauf hin, dass Fehlvorstellungen nicht immer und oftmals nur schwer korrigiert werden können (Schnitker, 2016; Peperkorn & Schwedler, 2021).

Lernwirksamkeit von digitalen Lernumgebungen. Zahlreiche Forschungen untersuchen die Wirksamkeit digitaler Lernszenarien zur Förderung des Stoff-Teilchen-Ebenenwechsels an konkreten chemischen Versuchen (vgl. Stieff, 2011; Haas & Marohn, 2022; Petillion & McNeil, 2020). Jedoch scheinen die Befunde weder zufriedenstellend noch abgeschlossen zu sein (Peperkorn & Schwedler, 2021; Schnitker, 2016). Die Ergebnisse sind oft nicht eindeutig und können nur schwer interpretiert werden, sodass sich unumstößliche Implikationen für den Fachunterricht nur selten anschließen (Al-Balushi & Al-Hajri, 2014; Schnitker, 2016; Peperkorn

& Schwedler, 2021; Petillion & McNeil, 2020). Überdies wird vermehrt auf Optimierungen und Umkonzeptionierungen der digitalen Lernumgebungen hingewiesen (Peperkorn & Schwedler, 2021). Dabei enthalten die digitalen Lernumgebungen häufig Videomaterial, sodass das reale Experimentieren in den Hintergrund rückt oder vollkommen unberücksichtigt bleibt. Ferner gehen die Konzeptionen des Öfteren undifferenziert auf die verschiedenen Modelldarstellungen in Form von Text, Symbol und Bild ein und verknüpfen die reale stoffliche Welt unzureichend mit der Teilchenebene. Die genannten Defizite in digitalen Lernsettings werden exemplarisch an einer videobasierten Lernumgebung für den Fachinhalt Redoxreaktion (vgl. Abbildung 8) beschrieben:

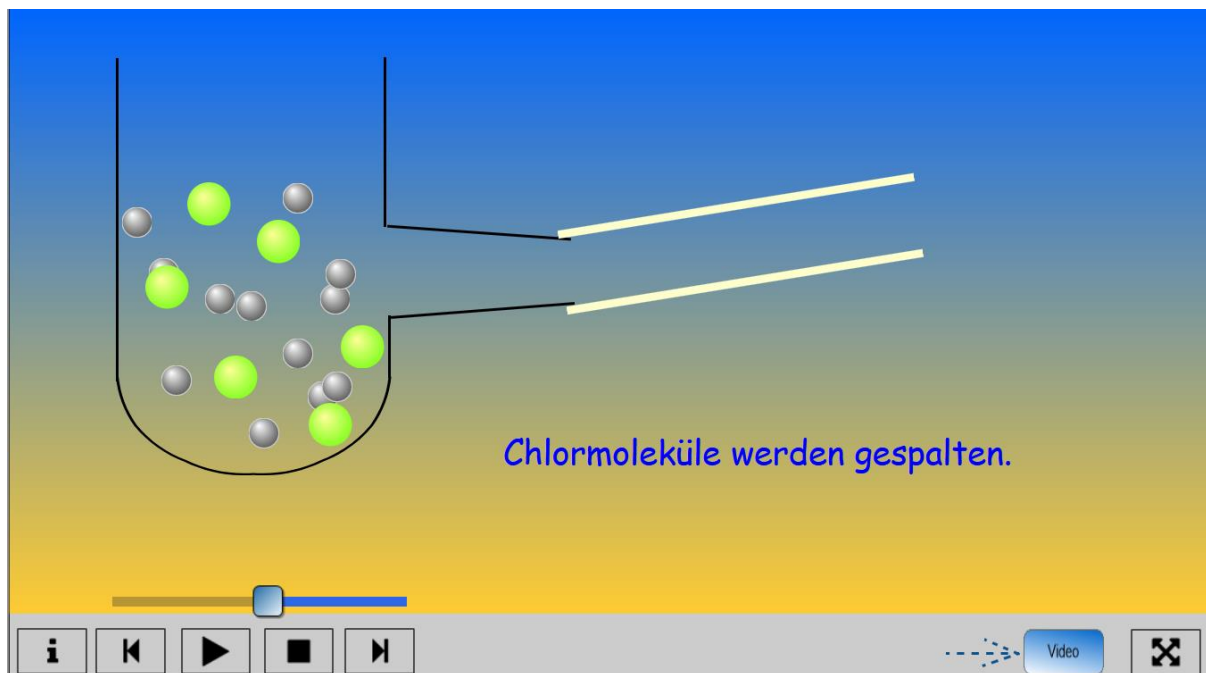


Abbildung 8. Ausschnitt einer videobasierten Lernumgebung zur Versuchsdurchführung der Synthese von Natriumchlorid (nach Chemie interaktiv, o.D.).

Die in Abbildung 8 dargestellte Lernumgebung von „Chemie-interaktiv“ weist Schwächen bei der fachsprachlich korrekten Umsetzung auf. Obgleich die Größenverhältnisse der Teilchen demonstriert wurden, scheint der Modellcharakter und die fachsprachliche Präzision (z.B.: Benennung der Ionen, Natrium-Kation Na^+ , Chlorid-Anion Cl^-) unzureichend demonstriert worden zu sein. Es wird lediglich die bildliche Darstellung gewählt, sodass Symbolschreibweisen und vor allem die chemische Reaktionsgleichung außen vor bleiben. Ferner ist der Lernende in der videobasierten Lernumgebung (vgl. Abbildung 8) gezwungen zwischen dem Video zur Darstellung des Phänomens „Synthese von Natriumchlorid“ auf Stoffebene und der Teilchenebene mit seinen Natrium-Kationen und Chlorid-Anionen durch Klickbewegung zu wechseln. Dabei werden die Ebenen nicht explizit in Relation gesetzt, sondern getrennt voneinander auf dem Bildschirm projiziert. Mit Blick auf die Text-Bild-Integration (Schnotz, 2001; Schnotz & Bannert, 2003; vgl. Kapitel 3.3) verletzt eine derartige Aufbereitung des Lernmaterials das Kontiguitätsprinzip nach Fiorella und Mayer (2021) und provoziert nach Ayres und Sweller

(2021) einen Split-Attention-Effekt (vgl. Kapitel 3.3). Der Lernende kann zwar selbstreguliert arbeiten, ist jedoch gezwungen die Informationen stets gesondert zu betrachten. Entsprechend können die verschiedenen Ebenen nur schwer identifiziert und kompetent ineinander überführt werden. Dies setzt eine hohe Transferleistung voraus, überwindet nur bedingt den hohen Abstraktionsgrad des Modells und führt vermutlich, vor allem bei Novizen (vgl. Johnstone, 2000) zu einer hohen kognitiven Belastung (vgl. Chandler & Sweller, 1991). Obgleich herkömmliche Anwendungen wie diese (vgl. Abbildung 8) die reale Stoffebene abbilden, so wird sie weder dynamisch noch räumlich und zeitlich mit den Teilchenprozessen verknüpft. Das „hin und her“-Klicken zwischen Video auf Stoffebene und Animation auf Teilchenebene wirkt sich dann gegebenenfalls negativ auf die kognitiven Verarbeitungsprozesse aus und behindert die Konstruktion eines belastbaren mentalen Modells (Fiorella & Mayer, 2021; Schnotz & Bannert, 2003; Mayer, 2014; Ayres & Sweller, 2014). Da die Kapazität des Arbeitsgedächtnisses zu sehr belastet wird, erschwert sich das Lernen (vgl. Sweller, 2011) und das Stoff-Teilchen-Konzept wird nicht nachhaltig gefördert. Folglich schöpft die Anwendung das Potential digitaler Medien für den Chemieunterricht nicht gänzlich aus.

Es sollte hinterfragt werden, welche digitalen Werkzeuge diesem spezifischen Problem entgegenwirken und warum sie das Verständnis und die Anwendung von MER beim Wechsel der Stoff- und Teilchenebene erleichtern können. In Anlehnung an Fischer et al. (2015) und Hillmayr et al. (2017) lässt sich zusammenfassen, dass effektive digitale Lernanwendungen zu selten als Unterstützungsmaßnahme für aktive und konstruktive Lernprozesse bei den Schülern eingesetzt werden. Es bedarf weiterer Entwürfe digitaler Lernszenarien für die Veranschaulichung komplexer Sachverhalte im Fach Chemie, wie beispielsweise für das räumliche Vorstellungsvermögen bei submikroskopischen Molekülstrukturen, welche alternative Strategien für die Initiierung von Modellierungsprozessen anbieten (vgl. Stieff, 2011). Infolgedessen lässt sich ein aktuelles und vielfach gefordertes Desiderat ableiten:

Digitale Unterrichtskonzeptionen zur Förderung des Stoff-Teilchen-Konzeptverständnisses im Fach Chemie sollten, orientiert an den individuellen Voraussetzungen der Lernenden, fach- und mediendidaktisch sowie pädagogisch-psychologisch weiterentwickelt, evaluiert und hinsichtlich ihres Mehrwerts für das Denken in den drei Ebenen nach Johnstone (2000) untersucht werden (vgl. Al-Balushi & Al-Hajri, 2014; Härtig et al., 2021; Schnitker, 2016).

4.4 Augmented Reality als innovative Technologie für den naturwissenschaftlichen Unterricht

„Die Erweiterung der Realität oder das Eintauchen in virtuelle Welten [...] sind absolute Trends im Bereich der Lehr- und Lernforschung“ (Buchner & Freisleben-Teutscher, 2020, S. 2). Augmented Reality (AR) und Virtual Reality (VR) finden als zukunftsweisende Technologien seit

den letzten Jahren nicht nur in der Industrie oder Medizin, sondern auch im Bildungsbereich, immer mehr Anklang (Buchner & Freisleben-Teutscher, 2020; Akçayır & Akçayır, 2017; Lauer & Peschel, 2021; Maier, 2014). Während sich der Betrachter bei der Virtual Reality-Technik (VR-Technik) im virtuellen Raum, d.h. in einer vollständig simulierten Umgebung, bewegt, verknüpft AR virtuelle und reale Welt (Azuma, 1997; Huwer et. al, 2019). Es lässt sich übergeordnet von *Mixed Reality* sprechen (Milgram & Kishino, 1994).

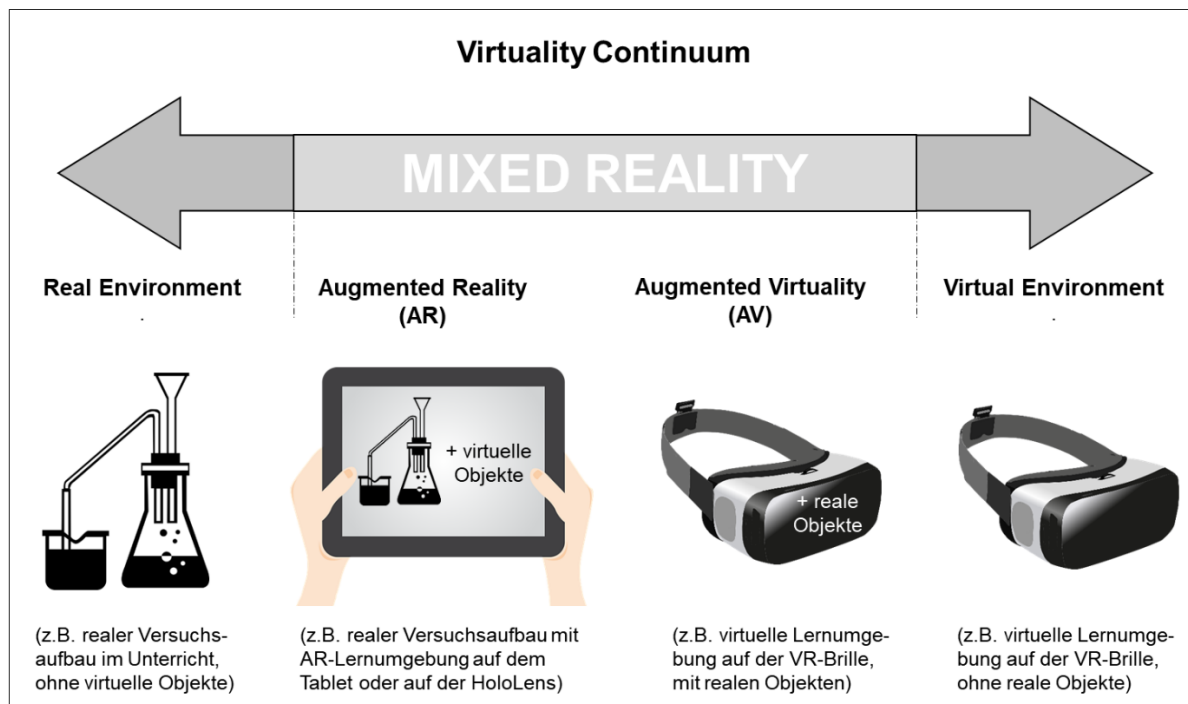


Abbildung 9. *Virtuality Continuum*, exemplarisch für den Chemieunterricht (angepasst nach Milgram & Kishino, 1994).

Abbildung 9 demonstriert das Konzept *Virtuality Continuum* nach Milgram und Kishino (1994) exemplarisch für das Unterrichtsfach Chemie, mit welchem die Abgrenzung der realen von der virtuellen Welt stufenweise dargestellt wird. Die erste Stufe repräsentiert die reale Umgebung (vgl. Real Environment in Abbildung 9 links), welche ausschließlich Objekte der realen Welt beinhaltet. Dies könnte zum Beispiel das Klassenzimmer mit der „echten“ Versuchsausrüstung und den real beobachtbaren chemischen Vorgängen, die sich in ihr abspielen, sein. Im Gegensatz dazu handelt es sich bei der vierten Stufe um die virtuelle Welt (Virtual Reality in Abbildung 9 rechts), die reale Elemente ausschließt, sich nur aus virtuellen Objekten zusammensetzt und gänzlich computergeneriert ist (vgl. Azuma, 1997). Es wird dann eine reale Szene in ein identisches virtuelles Format transferiert. Fleischer et al. (2022) entwickelten ein per Computergrafik simuliertes VR Chemielabor zur Thematik „Labor- und Gerätekunde“, das mithilfe geeigneter digitaler Medien (z.B. VR-Brille mit Controller) aufgerufen und interaktiv gesteuert werden kann, wobei die reale Umgebung vollständig ausgeblendet wird (vgl. Milgram & Kishino, 1994). Derartige Lernszenarien für das Unterrichtsfach Chemie existieren aktuell aber kaum. Zwischen diesen beiden Extrema des *Virtuality Continuums* lässt sich die

Mixed Reality mit ihren beiden Abstufungen AR und Augmented Virtuality (AV) einordnen, bei denen der Nutzer nur teilweise in die virtuelle Welt eintaucht und die umgebene Realwelt bedingt ausblendet (vgl. Abbildung 9; Azuma, 1997). Wohingegen AV reale Objekte (z.B. reale Laborgeräte) in ein virtuelles Setting (z.B. das virtuelle Schülerlabor) einbindet, wird bei der AR-Technik eine Mixed-Reality-Umgebung mit der Realität als Hauptbezugsebene geschaffen. Als Hilfsmittel im Fachunterricht kann die Technologie virtuelle Informationen zur Beschreibung bzw. Erklärung von chemischen Phänomenen liefern, ohne dabei die Realität zu ersetzen (Bacca et al., 2014). Mittels geeigneter Apps auf speziellen AR-Geräten können ergänzend AR-Objekte in eine reale Umgebung, die im Hintergrund bestehen bleibt, projiziert werden (vgl. Milgram & Kishino 1994; Lauer & Peschel, 2021; Buchner & Freisleben-Teutscher, 2020). Dabei erfolgt, nach Vermessung der realen Welt, mit der Kamerafunktion auf einem mobilen Displaygerät die Anreicherung eines Realbildes durch virtuelle Elemente (Milgram et al., 1994). Entsprechend werden, gemäß Lauer und Peschel (2021, 2023), die digitalen Abbilder der realen Welt (z.B. Kameraansicht in einem Display) als real und die virtuellen Elemente, die ohne der AR-App nicht aufgerufen werden können, als virtuell angesehen (Demarmels, 2012). Der Beobachter befindet sich damit physisch in einer real existierenden Räumlichkeit, die zugleich augmentierte Informationen, d.h. die Realität erweiternde Elemente, integriert (Azuma, 1997; Schmalstieg & Höllerer, 2016; Ibanez & Delgado-Kloos, 2018). In unserem Beispiel aus dem Chemieunterricht wäre die reale Umgebung der „echte“ Chemiesaal in der Schule, welcher simultan mit virtuellen Objekten wie (M)ER in einer AR-Lernumgebung computergrafisch erweitert bzw. überlagert wird (vgl. Migram & Kishino, 1994). Im Idealfall hat das Individuum den Eindruck, dass die virtuellen und realen Elemente im Raum koexistieren (Azuma, 1997). Aus den bisherigen Beschreibungen zur AR-Technologie, als eine Variante des Virtual Environments, geht insbesondere die räumliche Verknüpfung von realen und virtuellen Elementen in Echtzeit hervor. In Anlehnung an Azuma (1997) werden der AR weitere Erkennungsmerkmale zugeschrieben, die das große Potential der Technik demonstrieren. Mit AR können nicht nur 2D-Objekte virtuell auf einem Bildschirm dargestellt werden, vielmehr ist es die Dreidimensionalität in Form von statischen oder dynamischen (M)ER, die eine zentrale Rolle einnimmt. Zum anderen können die AR-Informationen interaktiv gesteuert werden (Dunleavy 2014; Azuma, 1997). Dabei ist es möglich, die Kombination aus physischer und digitaler Welt auf zwei Arten zu betrachten (Milgram & Kishino, 1994), entweder monitorbasiert auf einem einzigen Bildschirm (z.B. PC, Tablet, Smartphone) oder über unmittelbar in das Sichtfeld integrierte Displays in Form von AR-Brillen (z.B. Head-Mounted Display, abgekürzt HMD). Letztere sind jedoch aufgrund der Kosten und Komplexität in Alltag und Schule eher wenig vertreten (Lauer & Peschel, 2023). Am häufigsten wird die markerbasierte AR-Technik angewandt, bei der ein kontrastreicher Marker (z.B. QR Code) als *Trigger* verwendet wird, um die augmentierten Elemente aufzurufen. Dabei kann durch die Kamera eines Geräts

der vordefinierte Marker detektiert werden, um die Projektion der zugehörigen AR-Inhalte auszulösen. Die beiden Visualisierungsmöglichkeiten von AR in Form von Tablet oder AR-Brille ermöglichen unterschiedliche Handhabungen. Demnach unterscheiden sich die beiden Settings in Hinblick auf die interaktive Bedienung der augmentierten Objekte. Wohingegen der Nutzer bei dem Tablet die digitalen Objekte mittels Fingerbewegung auf dem Bildschirm steuert, werden die virtuellen Elemente, sichtbar durch die AR-Brille, wie reale Objekte im Raum bewegt. Das Verhalten in der augmentierten Welt gleicht dann derer im Realen, da der Nutzer tatsächlich den Eindruck gewinnt, in einer computer-generierten Welt präsent zu sein und sein Handeln folglich anpasst (vgl. Slater & Wilbur, 1997). Der Abruf von AR mittels entsprechender Brillen erzeugt dann das Gefühl der Immersion und führt zu einem Eintauchen in eine virtuelle Welt, welche von dem Individuum als Illusion der Wirklichkeit wahrgenommen wird (vgl. Slater & Wilbur, 1997; Buchner & Freisleben-Teutscher, 2020). Dieses Illusionserleben zieht schließlich auch eine andere Sicht auf die Objektrepräsentationen nach sich (vgl. Ainsworth, 1999; Schnotz & Bannert, 2003). Während die AR-Repräsentation mittels Kamerafunktion auf dem Tablet-Display eine digital replizierte Abbildung der Realwelt überlagert, werden die virtuellen Objekte mit Blick durch die AR-Brille immersiv in die reale Umgebung integriert (vgl. Lauer & Peschel, 2023). Aus fachdidaktischer Perspektive könnte die bewusste Wahrnehmung des Tablets als Bindeglied der realen und virtuellen Welt zu anderen Wirkungen auf den Lernprozess von Schülern als beim Immersionserleben mit der AR-Brille führen. Nach Dunleavy und Dede (2014) sollte sich AR insbesondere für konstruktivistische Lernumgebungen nützlich erweisen, da die Lernenden aktiv in den Lernprozess eingeschlossen werden und diesen selbstreguliert steuern können (Buchner & Freisleben-Teutscher, 2020). Der große Vorteil der AR-Technologie liegt in der Einbindung verschiedenster statischer und dynamischer (M)ER in die Realität (vgl. Chavan, 2016; Kozma & Russell, 2005; Ainsworth, 1999), mit denen der Lernende, neben den realen Elementen, beliebig interagieren kann (Azuma, 1997). Mit Blick auf die Representational Competence eröffnen sich dadurch vollkommen neue Chancen für das Lernen im Fach Chemie. Folglich kann sich AR als Interaktions- und Kommunikationsmittel positiv auf die Einstellungen und Motivation der Lernenden sowie vor allen Dingen auf die Lernleistung auswirken (Radu & Schneider, 2019; Bacca et al., 2014). Die Technologie bietet neue Bildungschancen für das multimediale Lernen (Keller & Habig, 2022; Hellriegel & Čubela, 2018; Buchner & Freisleben-Teutscher, 2020) und kann den Lernprozess als Fördermaßnahme vielversprechend unterstützen (Dunleavy & Dede, 2014). Wird die reale Welt in Form von Strukturen oder Versuchsapparaturen usw. mithilfe von AR inhaltlich erweitert, könnte dies lernförderlich für den kumulativen Wissensaufbau im Fach Chemie sein (Lauer & Peschel, 2023). Die Dimensionalität der AR-Objekte spielt dabei eine sehr große Rolle, da im naturwissenschaftlichen Unterricht bisweilen eher auf zweidimensionale Bilder (z.B. in Schulbüchern o.ä.) zurückgegriffen wird. Werden diese nun in 3D-Modelle transferiert, können sie gezielt

zweidimensionale Fachinhalte überlagern und das modellhafte Lernen erleichtern. Die Untersuchungen von Habig und Keller (2022) gehen der Frage nach, ob die Bearbeitung von AR-basierten Aufgaben aus der organischen Chemie unterstützend auf das räumliche Vorstellungsvermögen der Lernenden wirkt. Die Ergebnisse der Vergleichsstudie zeigen, dass Lernende, die mit AR-Hilfen arbeiteten, häufiger korrekte Rotationsoperationen ausführten als jene, die ohne AR-Unterstützung elaborierten. Entsprechend konnte im Zusammenhang mit chemischen Konzepten und Aufgaben die Wirksamkeit von AR auf das Raumverständnis nachgewiesen werden (Keller & Habig, 2022). In Anlehnung an Buchner und Freisleben-Teutscher (2020) sollten die Konzeptionen von AR-Lernwerkzeugen stets auf einer gestaltungsorientierten Mediendidaktik fußen, die sich Bildungsproblemen und -anliegen annimmt. Die kognitive Belastung kann nur dann reduziert werden, wenn die entsprechenden Gestaltungsprinzipien (vgl. Fiorella & Mayer, 2021) berücksichtigt werden (vgl. Schwanke & Trefzger, 2020; Keller & Habig, 2022). Entsprechend gilt es auf die Positionierung der virtuellen (M)ER in der realen Umgebung zu achten. Werden bei Ablauf eines realen chemischen Experiments unter Berücksichtigung der Dynamik submikroskopische Teilchen virtuell in das Experiment eingeblendet, können diese Informationen durch AR räumlich *und* zeitlich verbunden, sowie semantisch im Zusammenhang stehend gezeigt werden (Chavan, 2016; Schmalstieg & Höllerer, 2016). Damit besitzt AR die Stärke dynamische Abläufe veranschaulichen zu können (vgl. Fiorella & Mayer, 2021). Eine simultane Präsentation von Informationen, die nach Mayer (2014, 2021) Kohärenz und Kontiguität sicherstellt, sollte demzufolge positive Lerneffekte im Umgang mit den chemischen Repräsentationsformen sowie der Stoff- und Teilchenebene erzielen (Schnitker, 2016). Augmentierte (M)ER liefern damit gute Voraussetzungen, das naturwissenschaftliche Arbeiten zu fördern (vgl. Pedaste et al., 2012; Teichrew & Erb, 2018), da die beobachtbare, modellhafte Darstellung am realen Experiment Modellierungsprozesse initiiert, die eine direkte Verbindung zu den Gedankenkonstrukten herstellen und die Konstruktion eines geeigneten mentalen Modells nach sich ziehen kann (vgl. Schnotz, 2001a, 2001b). Ferner ist es der Split-Attention-Effekt (vgl. Ayres & Sweller, 2021), welcher durch die gezielte Einbindung von virtuellen Repräsentationen in die reale Umgebung, vermieden wird (vgl. Kapitel 3.3). Auf diese Weise können *neue* Lernumgebungen zur Visualisierung des Wechsels von makroskopischer auf submikroskopischer Ebene bei realer Versuchsdurchführung bzw. -beobachtung geschaffen werden, was ohne AR nicht möglich wäre (vgl. *Modification* oder *Redefinition* des SAMR-Frameworks nach Romrell et al., 2014). Mittlerweile finden sich viele Forschungen aus dem fachdidaktischen Bereich, die sich mit den kognitionspsychologischen Aspekten zur Förderung des konzeptionellen Verständnisses von Schülern befassen (Ibáñez & Delgado-Kloos, 2018). Dabei wird häufig die Cognitive Load-Theorie, im Sinne der kognitiven Belastung der Lernenden, fokussiert (Habig, 2019; Keller & Habig, 2022; Keller et al., 2021; Peeters et al., 2023; Thees et al., 2020). Im Vergleich zu anderen Technologien scheint sich der Einsatz

von AR positiv auf die kognitive Verarbeitung und die Lernleistung auszuwirken (Buchner et al., 2021), da Denkprozesse aktiviert werden, die für einen kumulativen Wissensaufbau sorgen (vgl. Schnotz & Bannert, 2003). Infolgedessen bietet AR, anders als „klassische“ digitale Lernanwendungen (vgl. Kapitel 4.3) neue Chancen zum erfolgreichen Lernen in den drei Ebenen nach Johnstone (2000) sowie zur Vermeidung der in Kapitel 2.2 berichteten Fehlvorstellungen (vgl. Puentedura, 2006; Justi & Gilbert, 2002; Johnstone, 1993, 2000; Schmalhofer, 1996).

4.4.1 Exemplarische AR-Lernanwendungen für den Chemieunterricht

Der Einsatz von AR kann spielerisch mittels AR-Games erfolgen. Buchner (2023) untersuchte beispielsweise in einer Pilotstudie, ob ein AR-basiertes Escape Game Lernziele in Hinblick auf *Fake News* adressieren kann. Die Befunde zeigen auf, dass das Spiel die Fähigkeiten, die Zuverlässigkeit von Informationen zu erkennen oder eine kritischere Haltung gegenüber der Vertrauenswürdigkeit von Online-Informationen zu entwickeln, stärken kann. Schließlich existieren bereits mehrere vorgefertigte AR-Lernarrangements für den Unterricht, die als Apps auf entsprechenden Endgeräten installiert werden können. Nachdem AR-Brillen zum jetzigen Zeitpunkt selten bis kaum im Fachunterricht eingesetzt werden, konzentriert sich die Nutzung von AR-Anwendungen eher auf mobile Endgeräte wie dem Smartphone oder Tablet (Tschiersch et al., 2021). Im Bildungsbereich finden sich daher häufiger monitorbasierte AR-Technologien (Akçayır und Akçayır 2017). Lehrende und Lernende können augmentierte Lernumgebungen auch selbst konstruieren (vgl. Tschiersch et al., 2021). Autorenwerkzeuge wie „CoSpaceEdu“, „Blippbuilder“ oder „ZapWorks“ mit zugehörigen Apps zum Aufrufen der AR-Lerneinheiten ermöglichen es, ohne umfangreicher Programmierkenntnisse, fachdidaktisch adäquate AR-basierte Lernutensilien zu konzipieren. Jedoch kann die Konstruktion solcher Lernumgebungen in den experimentellen Naturwissenschaften wie in der Chemie problematisch sein. Die Farblosigkeit der Gerätschaften aus Glas (z.B. Erlenmeyerkolben) erschweren aufgrund der Kontrastfreiheit das Tracking. Entsprechend gehen technische Schwierigkeiten bei der Erkennung der realen Lernumgebung, insbesondere bei schlechten Lichtverhältnissen, einher. Laut Tschiersch et al. (2021) sind die Einsatzmöglichkeiten im Unterricht daher, im Vergleich zu herkömmlichen digitalen Anwendungen, begrenzt. Dennoch finden sich neben AR-Settings für Forschungszwecke auch AR-Lernszenarien, die bereits im Unterricht eingesetzt werden. „Augmentierte Lehrbücher“ bieten den Lernenden beispielsweise die Möglichkeit, zu den bereits gegebenen analogen Fachinhalten im Buch zusätzlich AR-Informationen mittels Tablet oder Smartphone einzublenden (vgl. Mehler-Bicher et al., 2011, Schwanke & Trefzger, 2021). Empirische Studien vergleichen AR mit traditionellen Lernwerkzeugen und decken immer wieder positive Effekte auf (Radu 2014; Keller & Habig, 2022; Keller et al., 2021; Wu et al., 2013; Akçayır & Akçayır 2017; Buchner & Freisleben-Teutscher, 2020). Dabei unterscheiden sich die AR-angereicherten Lernarrangements in ihren pädagogischen sowie fachdidaktischen An-

sätzen und bieten für die große Menge an naturwissenschaftlichen Fachinhalten diverse Individualisierungsmöglichkeiten an, die den Wissens- und Fertigkeitserwerb verschiedenartig fördern können (Anderson & Anderson, 2019; Garzón & Acevedo, 2019; Lauer & Peschel, 2021). Vor allem bezüglich der Lernleistung und des Lernerfolgs, Autonomieerlebens beim Lernen sowie der Lernmotivation und Selbstwirksamkeitserwartung wurden vielversprechende Ergebnisse gemessen, die der Technologie einen großen Mehrwert für den Fachunterricht nachsagen (Akçayır & Akçayır, 2017; Schweiger et al., 2022, Bacca et al., 2014; Cai et al., 2019; Cheng & Tsai, 2013; Chang & Yu, 2018; Huwer et al., 2019)



Abbildung 10. Mergce Cube mit AR-Ausschnitten zur Projektion von 3D-AR-Objekten in den Würfel der realen Umgebung (nach Backwinkel GmbH, 2023).

Probst et al. (2021) führten eine Vergleichsstudie im Prä-Post-Design durch, die den fachdidaktischen Nutzen von dreidimensionalen interaktiven AR-Hilfen auf dem Mergce Cube (vgl. Abbildung 10) für das Verstehen und Lernen des Schalenmodells bei Schülern untersucht. Ihre Ergebnisse zeigen, dass die AR-Technik einen höheren Wissenszuwachs als die Animation erreicht und speziell dreidimensionale AR-Darstellungen lernwirksam sind. Geschlechtereffekte, wie die von Habig (2019) erhobene Lernförderlichkeit von AR bei männlichen Lernenden, wurden nicht gemessen. Probst et al. (2021) haben festgestellt, dass weibliche Lernende, die mit der interaktiven Animation arbeiteten, eine höhere Selbstwirksamkeit als mit AR besaßen. Gemäß Radu (2014) beeinflusst das hohe Motivations- und Interaktionspotenzial von AR das Kooperationsverhalten der Lernenden. Komplexe chemische oder physikalische Zusammenhänge des Alltags können mithilfe von AR-Modellen, insbesondere im Zuge des naturwissenschaftlichen Denkens und Arbeitens, auf die wesentlichen Dinge reduziert werden (vgl. Huwer et al., 2020). Aktuelle Untersuchungen, wie die von Frank et al. (2021) zu theoretisch-physikalischen Modellen, zielen auf die erfolgreiche Planung, Durchführung und Auswertung von AR-gestützten Experimenten ab. Als zentrales Kernelement von AR sollte das Potential des immersiven Erlebens durch modellhafte Visualisierungen an realen Objekten für das Ler-

nen in den Naturwissenschaften ausgeschöpft werden. Dies kann beim Experimentieren geschehen (vgl. Schwanke & Trefzger, 2021). Die meisten AR-Lehr- und Lernmittel für den MINT-Unterricht stützen sich auf explorativen oder simulationsbasierten Anwendungen (Ibáñez & Delgado-Kloos, 2018). Ibáñez et al. (2014) bestätigen, im Vergleich zu einer herkömmlichen Computersimulation, die positive Wirkung von AR in einem experimentalen Setting. Die Fachdidaktiker Huwer et al. (2019) setzten in einer Studiendurchführung als Werkzeug eine klassische Versuchsanleitung mit AR-gestützten Hilfen am Beispiel der Zitronenbatterie ein (vgl. Abbildung 11) und stellten fest, dass AR-Hilfen herkömmlichen analogen und digitalen Unterstützungsmaßnahmen überlegen sein können. Dabei wurde insbesondere das Potential der Dynamik zur Förderung der Lernleistung und Motivation nachgewiesen.

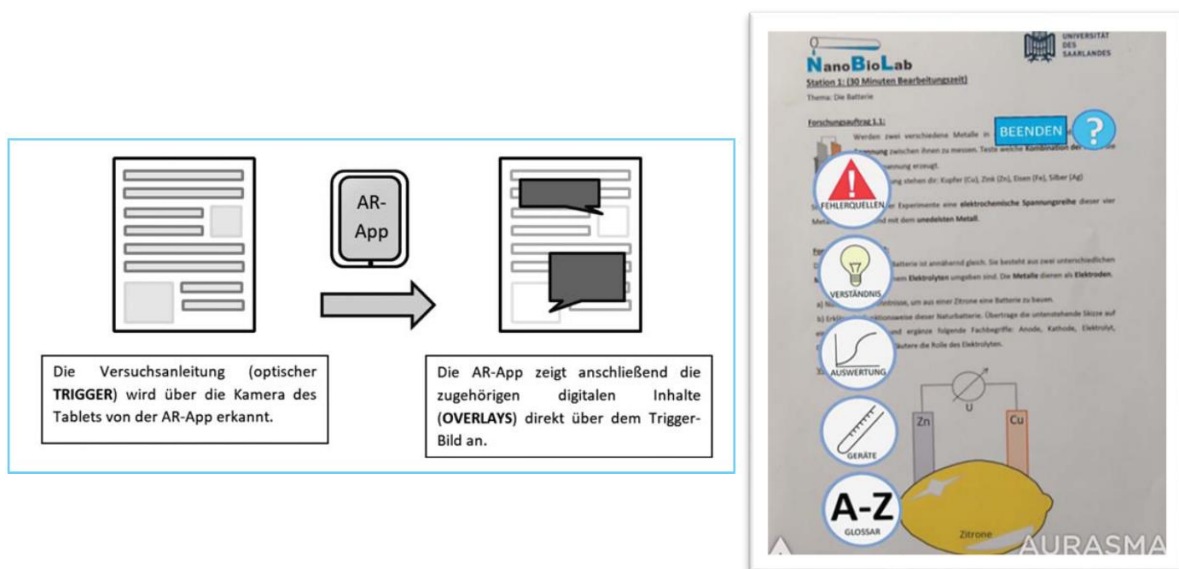


Abbildung 11. Arbeitsblattausschnitt mit AR-Hilfen (übernommen von Huwer et al., 2019).

Die Studie von Huwer et al. (2019) demonstriert die Möglichkeiten das forschende Experimentieren innovativ zu unterstützen, indem ein traditionelles Lehr- und Lernmaterial mittels augmentierter statischer und dynamischer (M)ER angereichert wird. Entsprechend spielt der fachwissenschaftliche Bezug des Schulfachs (hier: Chemie) eine große Rolle. Demnach wird der Verknüpfung von Stoff- und Teilchenebene durch Ergänzung konkreter AR-Hilfen ein hoher Stellenwert zugewiesen (Huwer et al., 2020). Auch innovative Lernumgebungen wie jene aus dem Projekt „EXBOX-Digital“ (s. Abbildung 12) fokussieren das selbstregulierte Experimentieren mit realen und virtuellen Objekten unter Zuhilfenahme von Videos und Bildern.



Welche Bereiche der Augmented Reality (AR) Hilfe 2 zum Experimentaufbau fokussieren die SchülerInnen?

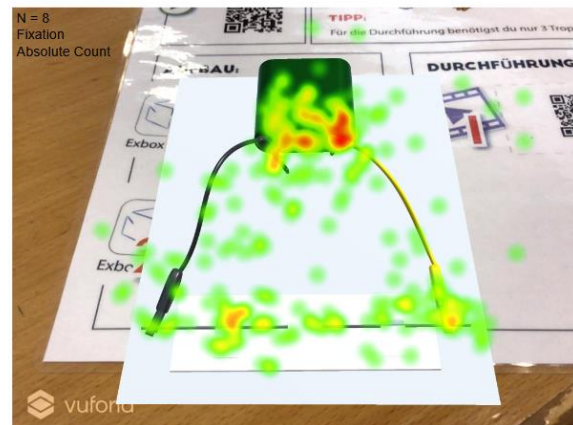


Abbildung 12. Ausschnitt eines Posters zur Demonstration der EXBOX-Digital am Beispiel der Microscale-Elektrolyse von Zinkiodid (übernommen von Fleischer et al., 2020).

Die Zielgruppe des Projekts sind vor allem sehr leistungsschwache Schüler, die durch eine AR-gestützte Experimentierbox schrittweise in ihrem Erkenntnisgewinnungsprozess angeleitet und adaptiv mit entsprechenden Hilfen beim Forschenden Lernen unterstützt werden (vgl. Fleischer et al., 2020). Mithilfe einer explorativen Eye-Tracking-Studie (vgl. rechts in Abbildung 12) wurde das Blickverhalten während der Durchführung eines Experiments zur Elektrolyse einer Zinkiodidlösung untersucht. Die Ergebnisse demonstrieren, dass sich die Lernenden die AR-Stützen erst ansehen, einzuprägen versuchen und dann zum Aufbau des Experiments übergehen. Dabei werden keine wiederholten Wechsel zwischen den AR-Hinweisen und dem realen experimentellen Aufbau angestellt.

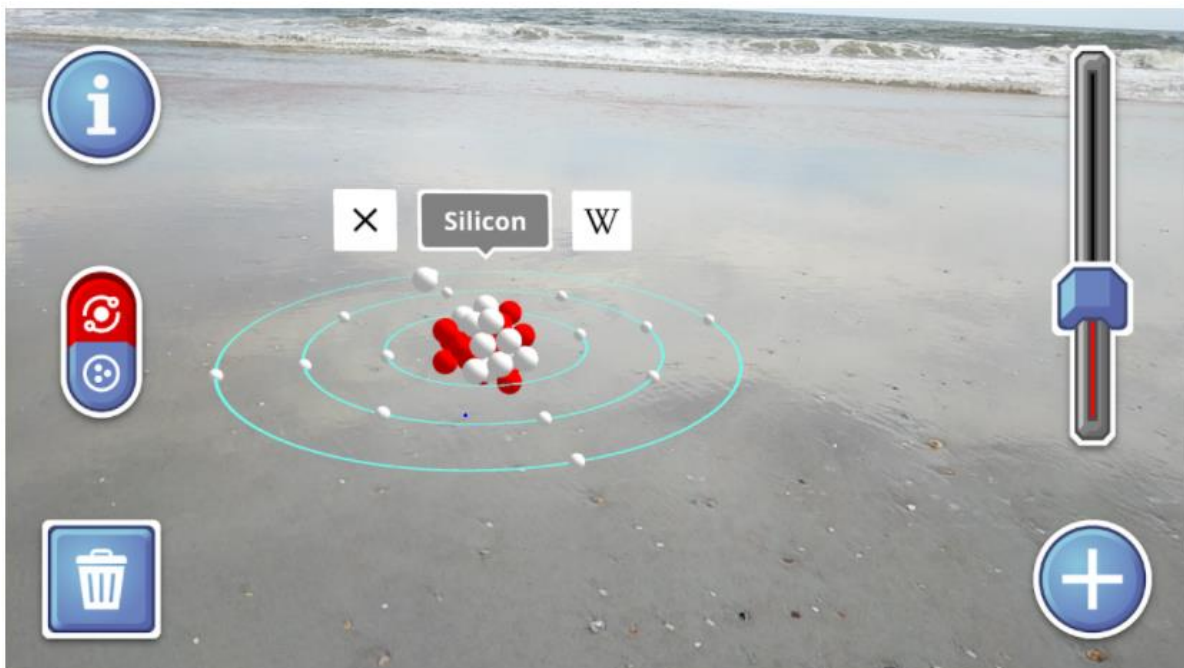


Abbildung 13. Ausschnitt der Atom Visualizer AR Core App zur Visualisierung des Bohrschen Atommodells am Beispiel Silizium (übernommen von Signal Garden Research, 2023).

Die Anwendung der App „Atom Visualizer AR Core“ (vgl. Abbildung 13) ermöglicht zwar die virtuelle Veranschaulichung eines Atommodells mittels Tablet, jedoch ist der Bezug zwischen AR- und Realobjekt nicht eindeutig (vgl. Abbildung 13). Der Sand als „SiO₂“ kann gegebenenfalls von einem jungen Lerner nicht direkt mit dem Atommodell in Verbindung gebracht werden. Entsprechend sollte deren Mehrwert für den Fachunterricht kritisch reflektiert werden. Ebenso wie bei vielen anderen aktuell käuflichen Apps fehlt die didaktische Rahmung. Entsprechend kann sie nicht als Selbstlernumgebung eingesetzt werden (Dunleavy & Dede, 2014). In Hinblick auf die Interaktivität sollte aber geradezu dieser Aspekte ausgenutzt werden (Scheerer, 2021). Überdies könnte der Lernende bei der Verwendung der *Atom Visualizer AR Core* App denken, die Elektronen bewegen sich auch in der Realität in Kreisbahnen äquidistant um den Atomkern. Um die Grenzen und Mängel des Bohrschen Atommodells zu diskutieren bedarf es daher einer situations- und adressatengerechten fachdidaktischen Rahmung durch die Lehrkraft. Obgleich die in Abbildung 13 demonstrierte App im Vergleich zu herkömmlichen Lernwerkzeugen keinen direkten Nachteil offenbart, kann ihr Nutzen auch nicht gerechtfertigt werden. Folglich entspräche der App-Einsatz im Chemieunterricht einer Substitution (vgl. SAMR-Framework nach Romrell et al., 2014), die tendenziell keinen Vorteil für das Lernen im Fach Chemie mit sich bringt und daher das Ziel der digitalen Umkonzeptionierung des Unterrichts verfehlt (vgl. Kapitel 4.1). Schließlich sollte ein lernwirksames AR-Lernsetting die Stärke der räumlichen und zeitlichen Verknüpfung von (dynamischen) Objekten mit der Realität ausnutzen (Buchner, 2023; Buchner & Freisleben-Teutscher, 2020; Buchner & Zumbach, 2020; Lauer & Peschel, 2023; Huwer et al., 2019; Azuma, 1997). Insgesamt scheint die Anzahl lern-effizienter AR-Apps für das Fach Chemie noch gering zu sein. Der Wunsch nach AR-Anwendungen, die das Arbeiten mit realen Laborgerätschaften ermöglichen, Bildungsprozesse wirksam unterstützen und das Lernen im Fach Chemie bereichern, ist folglich sehr groß (vgl. Schwanke & Trefzger, 2020; Buchner & Freisleben-Teutscher, 2020; Lauer & Peschel, 2023; Wyss et al., 2022). Zwar finden sich auch Versuchsdesigns, die AR-Anwendungen als Bildungstechnologien im Rahmen der Lehrkräfteausbildung untersuchen (vgl. Buchner & Zumbach, 2020; Wyss et al., 2021; Wyss et al., 2022) und häufig erste Tendenzen positiver Wirkungen auf die Motivation und den Lernerfolg zeigen (vgl. Buchner & Zumbach, 2020), dennoch sollten Untersuchungen zu den AR-Technologien in Lehr-Lernsituationen als Forschungsdesiderat angesehen werden (vgl. Lauer & Peschel, 2023).

4.4.2 Akzeptanz von Augmented Reality für den Einsatz im Unterricht

Soll eine innovative Technologie wie AR im Fachunterricht Anwendung finden, muss das Lehr- und Lernangebot von den Lehrenden und Lernenden angenommen werden (Bürg & Mandl, 2005; Bürg et al., 2005; Kopp et al., 2003). AR kann als digitales Werkzeug nur dann effizient für die Erweiterung des Professionswissens von Lehrkräften sein, wenn die Nutzer von dem digitalen Angebot überzeugt sind (Reinmann-Rothmeier et al., 1995; Kopp et al., 2003).

„Die Didaktisierung obliegt (damit auch weiterhin den) Lehrpersonen und Lehrenden. Wir sehen dies als Chance, denn so können Didaktiker [...] mitbestimmen, wie augmentiertes und immersives Lernen in Zukunft sinnvoll für Lehr- und Lernprozesse zum Einsatz kommen kann“

(Buchner & Freisleben-Teutscher, 2020, S. 10).

Laut Henne et al. (2021) werden aber die Einsatzmöglichkeiten digitaler Medien wie Simulations- und Modellierungsprogramme, unter anderem im experimentellen Kontext, im Unterricht aktuell kaum ausgeschöpft (vgl. auch Drossel et al., 2019). Buchner und Zumbach (2020) erklären in diesem Zusammenhang, dass die AR-Technik in der Lehrerbildung eine konstruktive Rolle einnehmen kann, diese aber eng verzahnt mit dem TPCK der (angehenden) Lehrpersonen ist (vgl. Kapitel 4.2.2). Lehrpersonen müssen in ihrer Kompetenzentwicklung unterstützt werden, damit sie ein Gefühl für die Funktionsweisen von Innovationen wie AR bekommen und diese hinsichtlich ihres fach- und mediendidaktischen sowie pädagogischen Potentials einschätzen können (vgl. Buchner & Zumbach, 2020). Nur wenn die Lehrkraft sensibilisiert wird und zufrieden mit dem digitalen Werkzeug ist (Kopp et al., 2003), können in der Folge die Weichen für eine erfolgreiche Implementierung in den Schulalltag gelegt werden (vgl. Kopp et al., 2003; Lauer & Peschel, 2023; Eichelmann et al., 2012; Jäger et al., 2014). Die Fähigkeit der Lehrperson, AR im Fachunterricht angemessen einzusetzen, hängt daher mit der Bildungstechnologie und der technischen Anwendung per se zusammen (vgl. Buchner & Zumbach, 2020). Neben den Rahmenbedingungen der Schule, wie zum Beispiel IT-Infrastruktur, Wertschätzung der Anstrengungen und Priorisierung der Medien durch die Schulleitung, hat vor allem die erfolgsversprechende Einschätzung und damit die Annahme des innovativen Lehr- und Lernwerkzeugs einen großen Einfluss auf den Einsatz von innovativen Technologien im Unterricht (vgl. Fischer et al., 2015; Krug et al., 2022).

Akzeptanz wird als positive Annahmeentscheidung einer innovativen Technologie definiert (vgl. Simon, 2001). Müller-Böling und Müller (1986) differenzieren zwischen zwei Ausprägungen von Akzeptanz, der Einstellungs- und Verhaltensakzeptanz. Die nicht direkt beobachtbare Einstellungsakzeptanz beinhaltet einerseits affektive Faktoren, die motivational-emotionale Aspekte beschreiben (vgl. Bürg, 2005; Simon, 2001). Andererseits fasst sie kognitive Faktoren zusammen, welche den Kosten und Nutzen von innovativen Technologien subjektiv abwägen (vgl. Bürg, 2005; Simon, 2001; Müller-Böling & Müller, 1986). Ferner wird die direkt beobachtbare Verhaltensakzeptanz angeführt. Sie kommt zum Vorschein, wenn sich eine positive Annahme des digitalen Werkzeugs im Nutzungsverhalten widerspiegelt. Daraus resultiert, in Anlehnung an Bürg (2005), dass Akzeptanz die Einstellung gegenüber einem Verhalten und das

Verhalten selbst beschreibt. Ferner ist die Einstellungsakzeptanz als Hauptprädiktor der Verhaltensakzeptanz zu betrachten (vgl. Venkatesh und Davis, 2000; Ajzen & Fishbein, 2010; Simon, 2001; Bürg, 2005).

Faktoren, die die Akzeptanz von Augmented Reality beeinflussen

Akzeptanzmodelle für Informationssysteme, wie z.B. das TAM-Modell, aus dem angloamerikanischen Raum beschäftigen sich mit dem wahrgenommenen Nutzen und der einfachen Bedienbarkeit, die eine Wirkung auf die Einstellungsakzeptanz haben (vgl. Davis, 1989; Goodhue, 1995; Venkatesh & Davis, 2000). Modellerweiterungen schließen zusätzlich personenbezogene Merkmale als soziale und kognitiv-instrumentelle Prozessvariablen (vgl. Venkatesh & Davis, 2000; Kopp et al., 2003) sowie Merkmale der Lernumgebung als Einflussfaktoren ein (vgl. Modell für Wissensmedien von Simon, 2001; Kopp et al., 2003). Auf dieser Basis entwickelte Bürg (2005) ein Modell zur Untersuchung der Akzeptanz von E-Learning. Auch er konzentriert sich auf die Merkmale der Lernumgebung und des Individuums und betrachtet überdies die institutionellen Rahmenbedingungen, welche sich aus personalen und organisationalen Maßnahmen sowie den technischen Rahmenbedingungen zusammensetzen.

Merkmale des Individuums. Laut Bürg (2005) ist die effektive Gestaltung digitaler Lernumgebungen meist sehr technikzentriert. Präkonzepte, individuelle Bedürfnisse und Interessen der Lernenden spielen oftmals eine untergeordnete Rolle. Es können nur Mutmaßungen angestellt werden, warum innovative Technologien häufig abgelehnt werden. Die Literatur macht jedoch deutlich, dass bei der Konzipierung von Lernumgebungen neben der Instruktionsmethode und der medialen Darstellung insbesondere die Merkmale des Lernenden zu berücksichtigen sind (vgl. Botella et al., 2018; Carrera et al., 2018; Lauer & Peschel, 2023; Sauro, 2011). Persönlichkeitsmerkmale beruhen auf der *Theory of Planned Behavior* nach Fishbein und Ajzen (2010), welche die Ansicht verfolgt, dass Persönlichkeitsmerkmale wie Einstellungen oder Selbstwirksamkeitserwartungen die Handlungsintention beeinflussen und derart das Verhalten einer Person verändern können. Demnach ist anzunehmen, dass die Kompetenz einschätzung der Chemielehrkräfte die Wahrscheinlichkeit eines gewünschten Verhaltens, wie den fachdidaktisch reflektierten Umgang mit AR, beeinflussen kann. Die Merkmale des Individuums lassen sich als Einflussfaktoren auf die Einstellungsakzeptanz in eine kognitive und eine motivational-emotionale Dimension untergliedern (vgl. Venkatesh, 2000; Bürg & Mandl, 2005; Bürg, 2005). Bereits Goodhue (1995) konnte empirisch belegen, dass affektive und kognitive Aspekte die Einstellungsakzeptanz beeinflussen. Auch Vogelsang et al. (2019) geben an, dass eine bestimmte Handlung durch kognitive Faktoren bestimmt ist. In diesem Zusammenhang wurden 2001 mit dem INCOBI-Test computerbezogene Einstellungen erfasst. Als kognitionsbasierte Einstellungen können sie durch kontrollierte kognitive Prozesse gebildet, verändert und handlungswirksam werden (Naumann et al., 2001). Die Empirie belegt, dass im

Rahmen der Akzeptanzforschung insbesondere die computerbezogenen Einstellungen bedeutsam sind (vgl. Bürg, 2005; Stegmann, 2020). Härtig et al. (2021) untermauern dieses Resultat. Aus ihren Forschungsergebnissen geht hervor, dass Lehrpersonen, die dem digitalen Medieneinsatz eine Lernförderlichkeit zuweisen, ihren Unterricht signifikant häufiger digital aufbereiten als Probanden, die digitale Medien tendenziell ablehnen. Die Implementation im Fachunterricht wird daher von der Akzeptanz der digitalen Anwendung bedingt und ist folglich stark von den Einstellungen der Lehrperson abhängig (vgl. Bürg, 2005; Dinse de Salas, 2019; Härtig et al., 2021). Graham et al. (2009) führten eine Pilotstudie zur Messung der Selbstwirksamkeitserwartungen von MINT-Lehrkräften in Bezug auf das TPACK-Modell durch. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass ein Zusammenhang zwischen dem Nutzungsverhalten und den Selbstwirksamkeitserwartungen zu digitalen Medien existieren (vgl. Graham et al., 2009). Selbstwirksamkeit beschreibt die subjektive Einschätzung der eigenen Fähigkeiten und Fertigkeiten (vgl. Vogelsang et al., 2019). Demnach rücken die Überzeugungen in den Hintergrund und die Sicherheit effizient zu handeln in den Vordergrund (Bürg, 2005). Entsprechend sollten Lehrkräfte, die ihr medienbezogenes fachdidaktisches Wissen sehr hoch einstufen, wie in einer Befragung von Sailer et al. (2017) bestätigt wurde, digitale Medien dezidierter in ihren Unterricht integrieren.

Merkmale der Lernumgebung. Es ist unabdingbar, dass sich Lernexperten aktiv an der Modifizierung von digitalen Lehr- und Lernangeboten beteiligen (Bürg, 2005; Reinmann-Rothmeier & Mandl, 1998). Laut Reinmann-Rothmeier und Mandl (2001) liegt bei der Entwicklung digitaler Lernumgebungen ein besonderes Augenmerk auf der didaktischen und medialen Materialgestaltung (vgl. Bürg, 2005). Ist es also das Ziel Innovationen wie AR erfolgreich in den Fachunterricht einzubinden, so ist ihre Beurteilung maßgebend (Karapanos et al., 2018; Lauer & Peschel, 2023; Lee et al., 2013). Krug et al. (2022) erklären, dass es notwendig sei, die Eigenschaften von AR-Lernszenarien mit geeigneten Bewertungsrastern zu evaluieren. Dabei demonstrieren Forschungen immer wieder technische Implementations- und Nutzungshürden von innovativen Settings wie AR (vgl. Muñoz-Cristóbal et al., 2018; Radu, 2014). Auch die Literatur zeigt einen Zusammenhang zwischen der Einschätzung digitaler Lernwerkzeuge und dem Interesse sowie perspektivischen Lernerfolg (Fitting et al., 2023; Karapanos et al., 2018). Bürg (2005) orientiert sich in seiner Untersuchung zur Akzeptanz von E-Learning in Unternehmen an drei Ausprägungen, einschließlich diverser Unterkategorien: 1) Problemorientiertes Lernen, 2) Didaktische Gestaltung mit den Unterkategorien *Authentizität* und *Situiertheit*, *Instruktionale Unterstützung* und *Selbststeuerung* sowie 3) Mediale Gestaltung mit den Unterkategorien *Verständlichkeit* und *Wirkung der Medien*. Das Vorgängermodell von Kopp et al. (2003) schloss unter anderem den Lernprozess als motivationalen Aspekt, den Lernerfolg und –transfer sowie die Zielexplication zur Evaluation des Einsatzes von „Neuen Medien“ im Projekt „Geoinformation – Neue Medien für die Einführung eines neuen Querschnittfachs“ mit ein.

Bereits Venkatesh und Davis (2000) sprechen in diesem Zusammenhang von *Ease of Use* bzw. dem mittlerweile gängigeren Ausdruck *Usability*. Fitting et al. (2023) übersetzen den Begriff *Usability* mit Benutzerfreundlichkeit bzw. Benutzbarkeit und erklären, dass die Usability einer digitalen Anwendung das einfache Erlernen von Funktionen, die zur Aufgabenerfüllung dienen, beinhaltet. Usability wird von dem Europäischen Komitee für Normung (EN ISO 9241-110, 2020) wie folgt zusammengefasst:

„The extent to which a system, product or service can be used by specified users to achieve specified goals with effectiveness, efficiency and satisfaction in a specified context of use“.

Effektivität zielt auf die Gründlichkeit und Vollständigkeit der Technologie ab. Die digitale Lernumgebung sollte leicht erlernbar sein. Sie muss technische Fehler weitgehend vermeiden und selbst nach unregelmäßiger Verwendung schnell bedienbar sein (Bürg, 2005). Unter Effizienz wird die Relation zwischen der eingesetzten Belastung und der Effektivität zur Zielerreichung verstanden (Figl, 2010). Letztlich ist es die Nutzerzufriedenheit, die eine positive Einstellung gegenüber der Innovation, mit wenigen Störfaktoren beschreibt (vgl. Nielsen, 1993, Bürg, 2005). Usability umfasst die Informations- und Systemqualität (Figl, 2010). Es wird deutlich, dass insbesondere die technischen Rahmenbedingungen einer Lernumgebung bei der Beurteilung von Lernumgebungen wichtig sind (Bürg, 2005). In Anlehnung an Meiselwitz und Sadera (2008) werden digitale Lernumgebungen nur dann durchgehend im Fachunterricht eingesetzt, wenn deren Bedienbarkeit stets gewährleistet werden kann (vgl. auch Fitting et al., 2023). Auch Lauer und Peschel (2023) betonen die Wichtigkeit der *Pedagogical Usability* von immersiven Lehr-Lernszenarien für den naturwissenschaftlich-orientierten Sachunterricht. Sie führten eine qualitative Studie durch, bei welcher die Einschätzungen der Nützlichkeit von AR-Lernwerkzeugen durch Grundschullehrkräfte erfasst wurden. Obwohl ihre Ergebnisse darauf hinweisen, dass Lehrpersonen das pädagogisch-didaktische Potential von AR tendenziell nicht erkennen und verschiedene AR-Szenarien nur schwer voneinander abgrenzen können, betonen sie die fundamentale Rolle der Usability-Befragung. Schließlich bildet sie die Basis für die weiteren fachlichen, pädagogischen, fach- und mediendidaktischen Entwicklungen, Einschätzungen und Implementierungen (vgl. Lauer & Peschel, 2023). In der (Akzeptanz-) Forschung werden Usability-Fragebögen immer häufiger als Evaluationsmethode eingesetzt (vgl. Wolf et al., 2020; Richter & Flückiger, 2016). Das EN ISO 9241-110 (2020) postuliert sieben Grundsätze von Usability-Fragebögen: Aufgabenangemessenheit, Selbstbeschreibungsfähigkeit, Steuerbarkeit, Erwartungskonformität, Fehlertoleranz, Individualisierbarkeit und Lernförderlichkeit (vgl. Prümper, 2008). Bereits Goodhue (1995) geht in seinem Akzeptanzmodell auf die Anforderungsbereiche von Lernumgebungen und die technischen Funktionen ein. Die wahrgenommene Nützlichkeit und die Nutzungsabsicht einer Innovation werden

demnach durch die Usability beeinflusst und haben infolgedessen einen fundamentalen Einfluss auf die Akzeptanz (vgl. Davis 1989; Bürg, 2005). So kann die Usability übergeordnet mit Blick auf die mediale und didaktische Gestaltung als Prädiktor der Akzeptanz angesehen werden (vgl. Reinmann-Rothmeier et al., 1997).

Für die vorliegende Studie werden die Faktoren *Merkmale der Lernumgebung* und *Merkmale des Individuums* zur Erfassung der Einstellungsakzeptanz als Prädiktoren der Verhaltensakzeptanz abgeleitet (vgl. Bürg, 2005). In diesem Zusammenhang wird die Gestaltung von digitalen Lernumgebungen unter dem Gesichtspunkt der Usability betrachtet (vgl. Lauer & Peschel, 2023; Figl, 2010; Eichelmann et al., 2012; Kopp et al., 2003). Die institutionellen Rahmenbedingungen (vgl. Bürg, 2005) bleiben bewusst unberührt. Folglich können zum jetzigen Zeitpunkt keine Aussagen über die schulischen Rahmenbedingungen wie die Partizipation, Betreuung oder Freiräume der Lehrkräfte während der Implementierungsphase an der Schule gemacht werden (s.o. personale und organisationale Maßnahmen nach Bürg, 2005). Die technischen Rahmenbedingungen in Form von Bedienbarkeit (vgl. Bürg, 2005) finden sich in dem Merkmal der Lernumgebung wieder (Kopp et al., 2003).

III ZIELE, FORSCHUNGSFRAGEN UND HYPOTHESEN

5 Zielsetzungen des Forschungsprojekts

Naturwissenschaftliche Grundbildung (engl. *Scientific Literacy*) zielt auf das Erkennen und Beobachten von chemischen Phänomenen im Alltag ab (vgl. KMK, 2005; Gräber, 2002). Dabei können stoffliche Eigenschaften zwar sinnlich wahrgenommen werden, nicht aber ihre submikroskopischen Zusammensetzungen. Für die Entwicklung eines angemessenen Stoff-Teilchen-Konzeptverständnisses (vgl. Kapitel 2) wird die Chemie in die submikroskopische, makroskopische und repräsentative Ebene geteilt. (vgl. Johnstone, 1993, 2000). Die adäquate Verknüpfung dieser Ebenen und ihre Wechsel ineinander (vgl. Kapitel 2.1) sind daher unerlässlich für den Erwerb und die (Weiter-) Entwicklung fachlicher und prozessbezogener Kompetenzen im Unterrichtsfach Chemie (vgl. KMK, 2005). Die Befunde der fachdidaktischen Lehr-Lernforschung (s. Kapitel 1 bis 4) demonstrieren im Zusammenhang mit dem Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis die Bedeutsamkeit von Modellierungsprozessen, welche mit der chemischen Fachsprache eng verzahnt sind. Der Representational Competence (vgl. Kapitel 3.2) wird dabei eine zentrale Rolle zugesprochen (Kozma & Russell, 1997, 2005). Nicht nur zur Veranschaulichung der stofflichen Welt, sondern auch zur Modellierung von Prozessen auf Teilchenebene bedient sich der Chemiker der repräsentativen Ebene (Treagust et al., 2003; Harrison & Treagust, 1996). Dabei werden die verschiedenen ER interpretiert, konstruiert und übersetzt sowie als MER sinnvoll miteinander verknüpft (vgl. Beck, 2017; Ainsworth, 1999). Hierbei steht die Übersetzungsleistung im Vordergrund, welche aufgrund der hohen Abstraktionsgrade höchst komplex in der Anwendung sein kann (vgl. Fleischer, 2018; Ainsworth, 1999; Chittleborough et al., 2002; Treagust et al., 2000). Der kumulative Wissensaufbau fußt auf kognitiven Verarbeitungsprozessen. Werden depiktionale und deskriptionale Repräsentationen simultan repräsentiert, so kommt das multimediale Lernen zum Vorschein (vgl. Kapitel 3.3). Die kognitive Verarbeitung durchläuft internal zwei unterschiedliche Kanäle, die zur Konstruktion mentaler Modelle oder/und propositionaler Repräsentationen führen und letztlich in die Entwicklung neuer externer Darstellungen münden können. Herausfordernd zeigt sich entsprechend das Lernen im Fach Chemie. Die Literatur deckt immer wieder die Schwierigkeiten im Umgang mit den Ebenen auf. Neben Schüler (-fehl) -vorstellungen, die Herausforderungen für die Lehrpersonen darstellen, ist das Denken in den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) auch für diese mit großen Schwierigkeiten verbunden (s. Kapitel 2.2.2 und 3.4). Lernende verstehen die Erklärungsfähigkeit des Teilchenmodells für die Stoffebene nur schwer und haben insgesamt Probleme korrekt mit den Symbolen als Veranschaulichung der beobachtbaren Welt umzugehen. Schwierigkeiten im Umgang mit der chemischen Fachsprache wirken sich, wie die Literatur immer wieder bestätigt (vgl. Kapitel 3.4), negativ auf das Konzeptverständnis beim Stoff-Teilchen-Ebenenwechsel aus (vgl. Taskin & Bernholt, 2014; s. Ka-

pitel 2.2.2). Gleichwohl treten, größtenteils aufgrund mangelnder fachsprachlicher Fertigkeiten, Fehlvorstellungen bei Schülern und Lehrkräften auf, die sich beim Lernen und bei der Vermittlung hervortun. Vor allem der Stoff-Teilchen-Ebenenwechsel wird unzureichend intendiert und, im Falle der Anwendung, vermehrt fehlerbehaftet vollzogen (vgl. Kapitel 2.2.2). Nachdem das Elaborationsverhalten des Lernenden stark von der medialen Aufbereitung der chemischen Inhalte durch den Lehrenden geprägt ist, sollten die Lehr- und Lernanwendungen genauestens betrachtet werden. Studien zum multimedialen Lernen nach Mayer (2004) und zur Cognitive Load-Theorie nach Sweller (2011) (vgl. Kapitel 3.3) betonen immer wieder, wie wichtig es bei der Unterrichtsmaterialgestaltung ist, aus kognitionspsychologischer Perspektive auf die Wahl und Anordnung der Darstellungsformen zu achten (Maresch, 2006). Als Maßnahme zur Förderung des Stoff-Teilchen-Konzeptverständnisses können Lehrende ihren Schülern eine Vielzahl an Lernwerkzeugen zur Verfügung stellen. Nach Festsetzung der Kompetenzen in der digitalen Welt (KMK; 2016) und spätestens seit der Corona-Pandemie im Jahre 2019 sind es vor allem auch digitale Lehr- und Lernmethoden (Fischer et al., 2015; Nerdel & Kotzebue, 2020; Scheiter, 2021), die im Fachunterricht verfolgt werden (müssen). Entsprechend wurden die Kompetenzrahmen T(D)PACK (Huwer et al., 2019; Koehler et al., 2014), DigCompEdu (Bavaria) (Redecker, 2017), K19+ -Rahmenmodell der Kernkompetenzen (*K19+ - Rahmenmodell Der Kernkompetenzen*, 2023) oder DiKoLan (Becker et al., 2020; Kotzebue et al., 2021) für Lehrkräfte ins Leben gerufen (vgl. Kapitel 4.2.2). Sie demonstrieren die heutige Schlüsselfunktion von digitalen Medien im Schulalltag und damit in unserer Gesellschaft. Ziel bei der Verwendung digitaler Medien sollte es stets sein, die digitalen Werkzeuge so zu nutzen, dass positive Lernergebnisse bei den Lernenden erlangt werden können (Helmke, 2002; Puentedua, 2006). Entsprechend stützen sich moderne Forschungen auf digitalen Medien und ihre revolutionären Möglichkeiten Modelle zu inspizieren oder zu gestalten und abstrakte Teilchenprozesse zu veranschaulichen. Durch die Anwendung von „klassischen“ digitalen Lernwerkzeugen wie Erklärfilmen oder Animationen zur Teilchenmodellierung scheinen jedoch die Hürden hinsichtlich des Denkens in den drei Ebenen (vgl. Johnstone, 1993, 2000) bisher nicht gänzlich beseitigt worden zu sein (vgl. Farida, 2009; Schnitker, 2016). Soll zudem, in Anlehnung an die Scientific Literacy (Gräber, 2002), das naturwissenschaftliche Arbeiten mit dem realen Experiment bzw. Versuch nicht vernachlässigt werden, so gestaltet sich der Einsatz digitaler Medien zur Unterstützung des bewussten Stoff-Teilchen-Ebenenwechsels am realen Versuchsaufbau äußerst schwer. Entsprechend sollte nach digitalen Lernszenarien gesucht werden, unter deren Zuhilfenahme die oben beschriebenen Schwierigkeiten verringert oder ganz vermieden werden und das reale naturwissenschaftliche Arbeiten mit realen Experimenten oder Versuchen gefördert wird. Die Multimediaforschung liefert nicht nur erste Evidenzen, welchen Einfluss digitale Medien im Allgemeinen auf das Unterrichtsfach Chemie haben (s. Kapitel 4.1). Sie fokussiert darüber hinaus Innovationen wie AR (vgl. Kapitel.

4.4) und zeigt, auf welcher vielseitigen Art und Weise diese im naturwissenschaftlichen Unterricht eingesetzt werden können. Bezugnehmend auf die theoretischen Überlegungen aus den vorherigen Kapiteln, eröffnet AR durch die simultane Verknüpfung von realer und digitaler Welt vollends neue Gelegenheiten kognitive Verarbeitungsprozesse hinsichtlich des Denkens in den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) anzuregen. AR-Lernumgebungen erlauben, gemäß des Kontiguitätsprinzips nach Fiorella und Mayer (2021), die zeitliche und räumliche Integration von Informationen auf Stoff- und Teilchenebene und verhindern somit einen Split-Attention-Effekt, der häufig bei analogen oder anderen digitalen Medien in Kombination mit dem Realexperiment vorkommt (Mayer, 2004; Ayres & Sweller, 2021). Virtuelle Einblendungen in realer Experimentierumgebung können, neben der Visualisierung von Teilchen wie Elektronen, auch aus chemischen Symbolen wie Reaktionsgleichungen oder anderen Textelementen wie Fachbegriffen bestehen und sollten je nach Vorwissen von dem Beobachter unterstützend genutzt werden (Schnitker, 2016; Akçayır & Akçayır, 2017; Nerdel, 2017). So können kognitive Verarbeitungsprozesse selbstreguliert gesteuert werden, um den Wechsel von Stoff- auf Teilchenebene bei realer Durchführung eines chemischen Experiments oder Versuchs erfahrbar zu machen (Mayer, 2014; Schnotz & Bannert, 2003; Talanquer, 2011; Azuma, 1997; Bacca et al., 2014; Schnitker, 2016). Damit können Translationen zwischen den Repräsentationen initiiert werden, die das Elaborationsverhalten in hohem Maße prägen (vgl. Ainsworth, 2006; Kozma & Russell, 2005). Lernende können semantische Vernetzungen zwischen den Symbolsystemen mithilfe der AR entwickeln, sich selbstständig auf die ihnen wesentlich erscheinenden Informationen konzentrieren und diese Wahrnehmungen mit ihren mentalen Wissensstrukturen verknüpfen (Schnotz & Bannert, 2003; Schwanke & Trefzger, 2021). Ein Denken in Modellen wird eingeleitet (vgl. Justi & Gilbert, 2002). Die Wirkungen von AR für das Lehren und Lernen im MINT-Bereich werden von Fachdidaktikern immer wieder aufs Neue untersucht (Altmeyer et al., 2020; Buchner, 2023; Buchner & Zumbach, 2020; Freese et al., 2021; Habig, 2019; Huwer & Banerji, 2020; Keller & Habig, 2022; Lauer & Peschel, 2023; Peeters et al., 2023; Thees et al., 2020). Mittels Vergleichsstudien wird häufig der Einfluss von AR auf das deklarative oder prozedurale Wissen überprüft. Diese konzentrieren sich hauptsächlich auf AR-gestützte Assistenzsysteme oder Unterrichtsmaterialien und untersuchen die Auswirkungen von AR auf die kognitive Belastung (Keller et al., 2021). Neben AR-gestützten Hilfen zur Förderung des selbstregulierten Lernens (vgl. Fleischer et al., 2022; Huwer et al., 2019) oder augmentierten Modelldarstellungen mittels Merge Cube (vgl. Probst et al., 2022) findet sich mittlerweile eine weite Bandbreite an AR-Lernszenarien für den MINT-Unterricht. Die chemiedidaktischen Forschungen zu AR zielen beispielsweise auf das räumliche Vorstellungsvermögen in der organischen Chemie oder das *Scaffolding* beim naturwissenschaftlichen Arbeiten ab (vgl. Keller & Habig, 2023; Kuhn et al., 2017; Schwanke & Trefzger, 2020; Thyssen et al., 2020). Auch finden sich Untersuchungen aus der Physikdidaktik (z.B. zur Bernoulli-Gleichung),

die sich dem Verständnis von komplexen wissenschaftlichen Konzepten durch die Visualisierung des Unsichtbaren annehmen (Yoon et al., 2017). Wird die mediale Gestaltung der AR-Lernmaterialien näher fokussiert, so stützt sich die chemiedidaktische Forschung sehr oft auf den Hardwaresystemen *Tablet* oder *Smartphone* (Huwer & Banerji, 2020; Keller & Habig, 2022; Thyssen et al., 2020; Huwer et al., 2019). Vor dem Hintergrund der Cognitive Load-Theorie nach Sweller (2011) werden häufig auch AR-Brillen untersucht (vgl. Lauer & Peschel, 2023; Wyss et al., 2021). Die High-Tech-Brille ermöglicht eine andersartige Interaktion mit den AR-Repräsentationen, sodass die Grenzen zwischen Realität und Virtualität weitgehend bzw. vollständig verschwinden und das Gefühl der Immersion erzeugt wird (vgl. Kapitel 4.4; Buchner & Freisleben-Teutscher, 2020). Obwohl die Literatur erste Hinweise liefert, dass die Einsatzmöglichkeiten der High-End-Technologie für den Chemieunterricht erfolgsversprechend sein können (Buchner & Zumbach, 2020), bleibt bis dato ungeklärt, in welchen konkreten chemischen Lernszenarien sich HMD-AR lernwirksam zeigt (Wyss et al., 2021; Lauer & Peschel, 2023). Bisherige „einfache“ AR-Szenarien können generell das Lernen im Fach Chemie, insbesondere in Hinblick auf das naturwissenschaftliche Arbeiten, vielversprechend unterstützen, jedoch wird das Potential von AR „Stoff- und Teilchenebene räumlich und zeitlich zu verknüpfen und konkrete Repräsentationswechsel einzubinden“ bisweilen nicht ausgeschöpft. Insbesondere im chemischen Kontext, fehlt eine explizite Betrachtung der Modellierung von Teilchenprozessen, veranschaulicht durch unterschiedliche AR-Repräsentationen, bei realem Versuchsablauf (vgl. Huwer et al., 2019). Trotz der zahlreichen Forschungen, bezüglich der kognitiven Verarbeitungsprozesse bei der Nutzung von AR-Lernszenarien, können bisher keine eindeutigen Implikationen aus den bestehenden Befunden abgeleitet werden (vgl. Buchner, 2023). Es wurde abermals darauf hingewiesen, dass das Forschungsfeld weiter untersucht werden muss, indem beispielsweise größere Stichproben und quantitative Ansätze verfolgt werden (vgl. Buchner & Zumbach, 2020). Akçayir und Akçayir (2017) unterstellen sogar, dass zahlreiche Untersuchungen ohne angemessener wissenschaftlicher Strenge durchgeführt wurden und fordern daher konsistentere und einheitlichere Analyseverfahren zur Bewertung von mobilen AR-Ansätzen. Ferner ist die Mannigfaltigkeit der Technologie mit all ihren verschiedenen Gestaltungsmöglichkeiten dafür verantwortlich, dass die Wirksamkeit von AR als Lehr- und Lernmittel noch immer offene Fragen aufwirft. Da die Technologie aber vollkommen neue Chancen für das Lernen in den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) bietet, ist es ein Forschungsdesiderat, die Wirksamkeit von AR-Lernumgebungen, insbesondere auch in Hinblick auf die Interaktivität bei der Verwendung von AR-Brillen, für das Lernen im Fach Chemie näher zu überprüfen (vgl. Buchner & Zumbach, 2020; Wyss et al., 2021). Entsprechend müssen Forschungen hinsichtlich des pädagogischen und fachdidaktischen Mehrwerts von AR für den Sach- bzw. Fachunterricht der Primar- bzw. Sekundarstufe angestellt

werden. Dabei sind Untersuchungen zur konzeptionellen Aufbereitung der AR-Lernanwendungen sowie zur Implementation in den Unterricht zwingend erforderlich (vgl. Lauer & Peschel, 2021, 2023). Entsprechend sollten AR-Lernumgebungen untersucht werden, deren Gestaltung sich auf kognitionspsychologischen Kriterien stützt (vgl. Fiorella & Mayer, 2021).

Im Zentrum dieser Studie steht daher die Untersuchung der Wirksamkeit von AR für das Denken in den drei Ebenen nach Johnstone (2000). In Anbetracht dessen stützt sich das Forschungsprojekt auf den medienbezogenen Fähigkeiten von Chemielehrkräften und demzufolge auf ihren Einstellungen und Selbstwirksamkeitserwartungen hinsichtlich digitaler Medien bzw. AR sowie der dadurch bedingten Akzeptanz von technisch innovativen Lehr- und Lernanwendungen. Diese affektiven Komponenten können sich auf den Kompetenzerwerb der Lehrpersonen auswirken und infolgedessen die adäquate Umsetzung innovativer Lehr- und Lernszenarien im Unterricht beeinflussen. Entsprechend wurden AR-Lernsettings zur Elektrolyse von Zinkiodid für das Tablet und die AR-Brille sowie eine non-AR-Variante für das Tablet entwickelt, welche sich an (angehende) Lehrkräfte zur Erweiterung ihres Professionswissens richten (vgl. Kapitel 4.2.2) und den von der Lehrkraft didaktisch reflektierten Einsatz innovativer digitaler Technologien (z.B. AR-Lernumgebungen) im Fachunterricht zum Ziel hat. AR-Lernumgebungen können nämlich nur dann erfolgsversprechend im Fachunterricht Anwendung finden, wenn die Lehrkräfte diesen aufgeschlossen gegenüberstehen, ihre Systemqualität positiv beurteilen und diese als Lernmaterial akzeptieren (vgl. Usability in Kapitel 4.4.2). In der Folge lassen sich medienbezogene Kompetenzen erweitern, sodass innovative Technologien wie AR perspektivisch Einzug im Fachunterricht finden.

5.1 Forschungsfrage der Vorstudie

Mit der Vorstudie war die Zielsetzung verbunden, zwei valide Testinstrumente zur Erfassung der Merkmale des Individuums sowie der AR-Lernumgebung zu entwickeln und diese auf Gültigkeit zu prüfen. Bilden die Testinstrumente die Einstellungen und Selbstwirksamkeit im Hinblick auf digitale Medien bzw. AR und die Akzeptanz sowie Usability valide und reliabel ab, können diese in Hauptstudie 1 eingesetzt werden (vgl. Osterlind, 1998). Ferner wurde in diesem Zuge ein erster Entwurf einer AR-Lernumgebung zur Förderung des Stoff-Teilchen-Konzeptverständnisses pilotiert. Demzufolge lässt sich mit Blick auf die spätere Verwendung in Hauptstudie 1 und 2 folgende Forschungsfrage ableiten:

FF_{Pilot}: Wie schätzen Naturwissenschafts- und Technologieexperten die Funktionen der AR-Lernumgebung (Usability) ein und inwieweit akzeptieren sie diese?

5.2 Forschungsfragen und Hypothesen von Hauptstudie 1

Im Zuge dieser Forschungsarbeit wird untersucht, ob MINT-Lehrkräfte digitalen Medien und innovativen Technologien aufgeschlossen gegenüberstehen, wie sie ihre eigenen Fähigkeiten im Umgang mit diesen einschätzen und inwiefern AR von Lehrpersonen aus dem MINT-Bereich fach- und mediendidaktisch eingeschätzt und als Lehr- und Lernwerkzeug akzeptiert wird. In diesem Zusammenhang werden die Personenmerkmale hinsichtlich digitaler Medien und AR als Einflussvariablen berücksichtigt (vgl. Vogelsang et al., 2019; Bürg, 2005). Auf motivational-emotionaler Ebene werden die Einstellungen und auf kognitiver Ebene die Selbstwirksamkeitserwartungen betrachtet (vgl. Kapitel 4.4.2). Ferner soll geklärt werden, ob AR, durch die gezielte Einbindung von (M)ER in einen realen Versuchsaufbau, zum Erwerb professioneller Kompetenzen von Lehrkräften beitragen kann. Folglich wird untersucht, inwiefern AR-gestützte Lernumgebungen auf dem Tablet oder der AR-Brille bzw. eine simulationsbasierte Lernumgebung zum Denken in den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) von Chemielehrkräften angenommen und hinsichtlich der Usability bewertet werden.

Merkmale des Individuums. In Hauptstudie 1 wird untersucht, welche Personenmerkmale MINT-Lehrkräfte in Bezug auf digitale Medien und innovative Technologien wie AR aufweisen. Dabei wird der Fokus vor allem auf Chemielehrkräfte gelegt. Aufgrund der mannigfaltigen technologischen Entwicklungen in Schule und Unterricht sollte sich, unter Berücksichtigung der Forschungen von Vogelsang et al. (2019) und Graham et al. (2009), ein relativ homogenes Bild hinsichtlich der Einstellungen und Selbstwirksamkeitserwartungen zu digitalen Medien offenbaren. Befragungen zu den Einstellungen von (angehenden) Lehrkräften deuten tendenziell auf positive motivationale Orientierungen hinsichtlich der digitalen Unterrichtsgestaltung hin (Vogelsang et al., 2019; Waffner, 2020). Es besteht die Annahme, dass der Einsatz digitaler Medien im Chemieunterricht von den Lehrpersonen überwiegend positiv eingeschätzt wird (Huwer et al., 2019; Buchner & Zumbach, 2020; Lauer & Peschel, 2023). Studien zur Selbstwirksamkeitserwartung hinsichtlich digitaler Medien geben erste Hinweise, dass sich Lehrpersonen sicher im Umgang mit digitalen Lernanwendungen fühlen (Buchner & Zumbach, 2020; Graham et al., 2009). Entsprechend ist zu erwarten, dass die Lehrpersonen auch ihre Fähigkeiten und Fertigkeiten bezüglich digitaler Lehr- und Lernmaterialien größtenteils positiv bewerten (Graham et al., 2009). Buchner und Zumbach (2020) diagnostizierten eine Korrelation zwischen dem Selbstkonzept bei der Verwendung von digitalen Unterrichtsmaterialien und AR-Lernszenarien. Es liegt prinzipiell die Vermutung nahe, dass die Chemielehrkräfte, unter anderem aufgrund der Motivation an der Datenerhebung teilzunehmen, AR aufgeschlossen gegenüberstehen (vgl. Knüsel Schäfer, 2020). Letztlich handelt es sich hierbei aber um eine (explorative) Teiluntersuchung, bei der grundsätzlich zu klären ist, welche Einstellungen Lehrpersonen hinsichtlich der technischen Innovation besitzen. Bisherige Studien zu AR deuten zwar oftmals auf positive Effekte hin, können aber, wegen ihrer qualitativen Studiendesigns

mit kleinen Stichprobengrößen, lediglich als Tendenzen angesehen werden (Buchner & Zumbach, 2020; Wyss et al., 2021; Wyss et al., 2022). In der fachdidaktischen Forschung ist AR mittlerweile ein gängigerer Begriff, doch wirkt die Lücke zwischen Wissenschaft und Schulalltag noch sehr groß. Die Technologie ist bisweilen eher unbekannt. Daher wird erwartet, dass nur eine geringe Anzahl an Lehrkräften AR kennt und von diesen nur wenige mit den Einsatzmöglichkeiten für den Fachunterricht vertraut sind (vgl. Wyss et al. 2022, Vogelsang et al., 2019; Waffner, 2020). Forschungsbefunde bestätigen, dass AR-Lernanwendungen bisher kaum im Fachunterricht eingebunden werden (Buchner & Zumbach, 2020; Vogelsang et al., 2019). Eindeutige Hypothesen zu den Einstellungen in Hinblick auf die AR-gestützte Unterrichtsgestaltung lassen sich daher nicht fundiert ableiten. Die Komplexität der Entwicklung von AR-Szenarien und der dadurch bedingte Mangel an derartigen Unterrichtsmaterialien sollte verantwortlich dafür sein, dass Lehrkräfte bis dato wenig Berührungspunkte mit der Technologie hatten (vgl. Wyss et al., 2022). Infolgedessen wird angenommen, dass nur sehr wenige Probanden Kompetenzen auf dem Gebiet entwickelt haben. Dies kann sodann eine geringe Selbstwirksamkeitseinschätzung nach sich ziehen (Dinse de Sala, 2019). Der Neuheitsgrad der High-End-Technologie sollte daher ausschlaggebend dafür sein, dass MINT-Lehrkräfte ihre Fähigkeiten bezüglich der Nutzung von AR niedrig einstufen. Demnach werden folgende Fragestellungen und Hypothesen zu den Merkmalen des Individuums untersucht:

FF1₁: Wie bewerten MINT-Lehrkräfte die Einsatzmöglichkeiten von digitalen Medien und Innovationen wie AR im MINT-Unterricht?

H1₁: Es wird angenommen, dass MINT-Lehrkräfte die Einsatzmöglichkeiten von digitalen Medien im MINT-Unterricht positiv einschätzen.

FF2₁: Wie schätzen MINT-Lehrkräfte ihre/n Fähigkeiten/Umgang hinsichtlich digitaler Medien und Innovationen wie AR ein?

H2.1₁: Es wird angenommen, dass MINT-Lehrkräfte ihre/n Fähigkeiten/Umgang hinsichtlich digitaler Medien hoch einschätzen.

H2.2₁: Es wird angenommen, dass MINT-Lehrkräfte ihre/n Fähigkeiten/Umgang hinsichtlich Innovationen wie AR vergleichsweise niedrig einschätzen.

Merkmale der Lernumgebung. Ein weiterer Aspekt, der in Hauptstudie 1 untersucht wird, ist die Akzeptanz und Systemqualität (Usability) der AR-Lernumgebung zur Förderung des Stoff-Teilchen-Konzeptverständnisses bei Chemielehrkräften. Es wird der Frage nachgegangen, ob sich der Nutzer (hier: Chemielehrkraft) für den Einsatz der AR-Lernumgebung als Lehr- und Lernmaterial entscheidet, sich der Innovation bewusst annimmt und diese innovative Technologie als Lehr- und Lernwerkzeug akzeptiert (vgl. Kollmann, 1998; Simon, 2001; Bürg, 2005). Schließlich muss in diesem Kontext die Systemqualität und Benutzerfreundlichkeit der AR-

Lernumgebung geprüft werden. Orientiert an den Befunden zur Akzeptanzforschung (vgl. Kapitel 4.4.2) wird angenommen, dass aufgrund des evidenzbasierten, fachdidaktisch ausgereiften Konzepts (vgl. Kapitel 6.4 und 8.3) die AR-Lernumgebung positiv eingeschätzt und folglich von den Chemielehrkräften akzeptiert wird (vgl. Bürg, 2005). Auch die Untersuchungen von Buchner und Zumbach (2020) deuten auf den Trend hin, dass Lehrpersonen nach Auseinandersetzung mit der AR-Technologie diese mehr annehmen (Buchner & Zumbach, 2020). In Hinblick auf die mediale Aufbereitung der AR-Lernumgebungen, die sich auf den genannten kognitionspsychologischen Inhalten stützt, werden positive Effekte nach der Nutzung von AR-Repräsentationen erwartet. Entsprechend liegt aus fach- und mediendidaktischer Sicht (vgl. Kapitel 3.3) die Vermutung nahe, dass AR-Lernumgebungen erfolgsversprechender für den Einsatz im Unterricht angesehen werden als andere digitale Lernumgebungen. Demnach wird angenommen, dass AR-Lernumgebungen positiver beurteilt werden und infolgedessen eine höhere Akzeptanz nach sich ziehen. Darüber hinaus ist zu erwarten, dass die Variation der technischen Ausgestaltung von AR einen motivationalen Einfluss hat und High-End-Hardware-systeme (HMD-AR-Technik auf der AR-Brille) sowie die damit verbundenen neuen Möglichkeiten der Interaktivität (Immersion) besser bewertet und in höherem Maße akzeptiert werden (Wyss et al., 2021). Hieraus ergeben sich für die Merkmale der Lernumgebung die Forschungsfragen FF3₁ und FF4₁ mit den entsprechenden Hypothesen H3₁ und H4₁:

FF3₁: Wie schätzen Chemielehrkräften die Usability von AR-Lernumgebung ein?

H3₁: Es wird angenommen, dass Chemielehrkräfte AR-Lernumgebungen positiv einschätzen und dass High-End-Hardwaresysteme bei der Anwendung von AR einen positiven Einfluss auf die Bewertung von AR haben.

FF4₁: Inwieweit werden AR-Lernumgebungen von Chemielehrkräften akzeptiert?

H4₁: Es wird angenommen, dass Chemielehrkräfte AR-Lernumgebungen akzeptieren und dass die Verwendung von AR-Brillen diese Akzeptanz begünstigt.

Zusammenhänge zwischen den Merkmalen des Individuums bzw. der Lernumgebung und der Akzeptanz. Ferner stehen die Zusammenhänge zwischen den Personenmerkmalen der Chemielehrkräfte bzw. der Usability der AR-Lernumgebung und der Akzeptanz von AR im Zentrum von Hauptstudie 1. Dabei wird auch geprüft, ob Zusammenhänge zwischen den Merkmalen des Individuums und der Lernumgebung vorliegen. Mit Blick auf die Lernwirksamkeit der AR-Lernumgebung können sich eben jene affektiven Komponenten auf die Ergebnisse von Hauptstudie 2 auswirken (vgl. Kapitel 12). Eine positive Bewertung der Usability eines Lernmaterials beeinflusst laut Karapanos et al. (2018) den tatsächlichen Lernerfolg. Daher wird der Frage nachgegangen, inwiefern sich die Merkmale des Individuums bzw. der Lernumgebung auf die Akzeptanz des AR-Settings auswirken. In Anlehnung an die Forschungen von

Bürg (2005) liegt die Vermutung nahe, dass jeweils ein positiver Zusammenhang zwischen den Personenmerkmalen bzw. der Usability und der Akzeptanz vorherrscht. Obgleich sich annehmen ließe, dass positive Einstellungen und Selbstwirksamkeitserwartungen hinsichtlich digitaler Medien und AR eine akzeptanzfördernde Wirkung zur Folge haben (vgl. Bürg, 2005), ist aufgrund des stark innovativen High-End-Charakters der Innovation AR eine derartige Annahme schwer zu treffen. Es werden zwar Zusammenhänge zwischen den Merkmalen des Individuums bzw. der Lernumgebung und der Akzeptanz der AR-Lernumgebung erwartet, diese gilt es jedoch, ähnlich wie in den Forschungen zu AR von Wyss et al. (2021), an einem konkreten Beispiel für den Chemieunterricht zu ergründen. Auf Basis dieser Analysen soll entschieden werden, ob Regressionsanalysen zur Identifikation der Wirkrichtungen durchgeführt werden können (vgl. Glowinski, 2007). Entsprechend werden, bezogen auf die Zusammenhänge zwischen den Merkmalen des Individuums bzw. der Lernumgebung und der Akzeptanz drei Forschungsfragen FF5₁, FF6₁ und FF7₁ formuliert, deren Beantwortung explorativ erfolgt.

FF5₁: Wie hängen die erhobenen Merkmale des Individuums mit den Merkmalen der Lernumgebung zusammen?

FF6₁: Wie hängen die erhobenen Merkmale des Individuums und der Lernumgebung mit der Akzeptanz zusammen?

FF7₁: Inwieweit wirken die Merkmale des Individuums und der Lernumgebung auf die Akzeptanz?

5.3 Forschungsfragen und Hypothesen von Hauptstudie 2

Die Innovation AR bietet aufgrund ihrer technischen Funktionen beste Voraussetzungen, um als Unterstützungsmaßnahme zur Förderung des Stoff-Teilchen-Konzeptverständnisses bei realer Versuchsdurchführung eingesetzt zu werden. Neben der zeitlichen und räumlichen Integration von AR-Objekten in einen realen Versuchsaufbau, ermöglicht AR eine Interaktivität mit den augmentierten Darstellungsformen, wie beispielsweise den submikroskopischen Teilchen, und lässt dabei die Dynamik nicht unberücksichtigt. Aus kognitionspsychologischer Sicht ist es lernförderlich, derartige interaktive Visualisierungen für den Wissenserwerb zu nutzen (Farida et al., 2010; Schnotz & Bannert, 2003; Mayer, 2014). Hauptstudie 2 geht daher der Frage nach, inwiefern sich AR lernwirksam auf das Konzeptverständnis beim Stoff-Teilchen-Ebenenwechsel in einer realen Versuchsdurchführung auswirkt. Ferner soll untersucht werden, ob sich durch den Umgang mit den augmentierten (M)ER, bei der Durchführung eines realen chemischen Versuchs, spezifische Elaborationsprofile entwickeln. Folglich besteht die Annahme, dass die Bearbeitung von AR-Lernumgebungen ein sichtbar verbessertes Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis nach sich zieht und sich Fehlkonzepte deutlich verringern, da die zeitliche und räumliche Verknüpfung der AR-Repräsentationen mit der realen Versuchsanlage nicht nur Kontiguität sicherstellt, sondern auch Split-Attention vermeidet. Dadurch

sollten die kognitiven Verarbeitungsprozesse positiv beeinflusst werden. Demnach wird vermutet, dass AR-Settings die Fokussierung auf den gezielten Wechsel von Stoff- auf Teilchenebene und die selbstgesteuerte Interaktion mit (M)ER fördern. Insofern sollte sich auch der Umgang mit den Repräsentationsformen bzw. der chemischen Fachsprache und entsprechend das Denken in den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000; vgl. Kapitel 2.1) verbessern. Aus kognitionspsychologischer Sicht sind AR-Lernumgebungen anderen digitalen Lernumgebungen überlegen, weil sie die Gestaltungskriterien zur Kohärenz, Kontiguität einhalten, Split-Attention vermeiden und angesichts dessen mentale Modellierungsprozesse zur Verbesserung des Stoff-Teilchen-Konzeptverständnisses initiieren können. Demzufolge ist nach Bearbeitung der non-AR-Lernumgebung zu erwarten, dass Fehlkonzepte nur bedingt verringert werden oder sogar beständig bleiben. Auch hinsichtlich des Umgangs mit den Repräsentationsformen und der chemischen Fachsprache wird nur eine kleine positive Änderung vermutet. Mit Blick auf die zu erwartenden Lerneffekte sollten daher unterschiedliche Elaborationsprofile beschrieben werden können, die sich als spezifische Denk- und Verhaltensmuster in den entsprechenden Gruppen abzeichnen (vgl. Kroß & Lind, 2001). Daraus ergeben sich folgende Forschungsfragen und Hypothesen:

FF1₂: Lassen sich mithilfe der verwendeten AR-Lernumgebung das Konzeptverständnis zum Stoff-Teilchen-Ebenenwechsel und anwendbares Wissen für die reflektierte Verwendung von Stoff- und Teilchenebene bei Chemielehrkräften fördern?

H1.1₂: Es wird vermutet, dass die Verwendung der AR-Lernumgebung das Konzeptverständnis beim Stoff-Teilchen-Ebenenwechsel bei Beobachtung eines realen chemischen Versuchs fördert.

H1.2₂: Es wird vermutet, dass die Nutzung der AR-Lernumgebung durch die Integration der repräsentativen Ebene in die reale Versuchsapparatur einen positiven Effekt auf das Denken in den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) hat.

FF2₂: Können durch den Umgang mit AR-Repräsentationsformen bei der Durchführung eines realen chemischen Versuchs unterschiedliche Elaborationsprofile beschrieben werden?

H2₂: Es wird vermutet, dass sich durch die Verwendung der AR-Repräsentationsformen bei realer Versuchsdurchführung unterschiedliche Elaborationsprofile entwickeln.

Ferner untersucht Hauptstudie 2 in einem erweiterten, neuen Studiendesign, angelehnt an die Fragestellungen FF1₂ und FF2₂, die Wirkung der Interaktivität bei der Nutzung von AR-Repräsentationen auf das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis.

Der positive Einfluss von AR sollte vor allem nach Bearbeitung der HMD-AR-Lernumgebung zum Vorschein kommen. Es liegt nämlich die Vermutung nahe, dass sich die Interaktivität mit

den AR-Repräsentationen bei Tragen einer AR-Brille positiv auf den Umgang mit der chemischen Fachsprache auswirkt und die Representational Competence (Kozma & Russell, 1997, 2005) sichtlich verbessert. Bereits die selbstregulierte Steuerung der AR-Repräsentationen in dem „einfachen“ AR-Setting auf dem Tablet sollte positive Wirkungen aufzeigen. Auf dieser Basis sollte das immersive Erleben mit der AR-Brille diesen Effekt verstärken und sich folglich positiv auf die Intensität der Elaboration auswirken. Schließlich ist die Immersion von realer und virtueller Welt, d.h. die stark ausgeprägte Realität, nicht nur sehr motivationsfördernd (vgl. Wyss et al., 2021), die Verknüpfung von realen Objekten mit immersiven AR-Repräsentationen sollte darüber hinaus das Operieren auf repräsentativer Ebene erleichtern und folglich kognitiven Überlastungen entgegenwirken (vgl. Schnotz, 20019; Sweller, 2011). Daher wird erwartet, dass Probanden, die die HMD-AR-Technik nutzen, sensitiver auf die Interaktivität reagieren und folglich ihr Denken in den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) immens unterstützt wird. In Anlehnung an H2₂ sollten sich unterschiedliche Elaborationsprofile bei der Durchführung eines realen chemischen Versuchs abzeichnen. Es leiten sich daher die Forschungsfragen FF3₂ und FF4₂ mit den entsprechenden Hypothesen H3₂ und H4₂ ab:

FF3₂: Inwieweit kann durch die interaktive Verwendung von AR-Repräsentationsformen in der Lernumgebung das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis bei Chemielehrkräften gefördert und entsprechend das Denken in den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) positiv beeinflusst werden?

H3₂: Es wird vermutet, dass sich der positive Effekt des Denkens in den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) auf beide Gruppen auswirkt, jedoch aufgrund des immersiven Erlebens verstärkt auf die Chemielehrkräfte, welche das HMD-AR-Setting nutzen.

FF4₂: Können durch den interaktiven Umgang mit AR-Repräsentationsformen bei realer Versuchsdurchführung unterschiedliche Elaborationsprofile beschrieben werden?

H4₂: Es wird vermutet, dass sich unterschiedliche Elaborationsprofile in Abhängigkeit von der interaktiven Nutzung der AR-Repräsentationen und ihrer Immersionsstärke beschreiben lassen (vgl. H2₂).

IV VORSTUDIE

6 Materialien und Methoden Vorstudie**6.1 Stichprobe**

An der Pilotstudie nahmen 20 Personen (60 % Frauen, 40 % Männer, Alter $M = 28$, $SD = 5.2$) teil, die den Vortest zur Erfassung der Selbstwirksamkeitserwartungen und Einstellungen beantworteten. Mit einer Abbruchquote von 10 % vollzog sich die anschließende Testung der AR-Lernumgebung im Fachdidaktik-Labor der Professur für Fachdidaktik Life Sciences der TUM am Campus Garching, sodass danach 18 Personen den Nachtest zur Akzeptanz- und Usability ausfüllten. Die kleine Stichprobengröße ist auf die Maßnahmen der Corona-Pandemie zurückzuführen, sollte jedoch in Hinblick auf die Pilotierung der Testinstrumente bzw. Lernumgebung ausreichend sein (vgl. Moosbrugger & Kelava, 2012). Tabelle 2 liefert die aktuellen Tätigkeitsbereiche der Versuchspersonen. Es wurden vorrangig Naturwissenschaftsexperten mit Schwerpunkt Chemie befragt. Dabei handelte es sich sowohl um wissenschaftliche Mitarbeiter aus den naturwissenschaftlichen Fachbereichen der Chemie, Molekularbiologie, Informatik, Chemie- und Biologiedidaktik als auch um (ehemalige) Lehramtsstudierende (keine Lehrperson, vgl. Tabelle 2). Zusätzlich sollten Technologieexperten (keine Lehrperson, vgl. Tabelle 2) in Hinblick auf die Bewertung der Systemqualität der AR-Lernumgebung gewinnbringende Ergebnisse liefern.

Tabelle 2. Häufigkeitsverteilung der Probanden in ihre Tätigkeitsbereiche (N = 20).

Tätigkeit	Häufigkeit	Prozent [%]
keine Lehrperson	10	50
Chemielehrkraft (Gymnasium)	2	10
Wissenschaftliche/r Mitarbeiter (Universität)	8	40
Gesamt	20	100

Bei der Probandenauswahl wurde darauf geachtet, dass alle Versuchsteilnehmende hinsichtlich ihres Studiums einen naturwissenschaftlichen Hintergrund besitzen (vgl. Tabelle 3).

Tabelle 3. Häufigkeitsverteilung der Probanden hinsichtlich ihres Studiums (N = 20).

Studium	Häufigkeit	Prozent [%]
Bioinformatik	2	10
Biologie	1	5
Biomedizinische Neurowissenschaften	1	5
Chemie	1	5
Gym-Lehramt (B/Ch)	7	35
Gym-Lehramt (Ma/Ch)	7	35
Gym-Lehramt (Ma/Phy)	1	5
Gesamt	20	100

Sie alle sollten ein umfangreiches chemisches Grundwissen besitzen, um mit ihrer Expertise insbesondere die fachliche und fachdidaktische, aber auch die mediendidaktische und methodische Gestaltung der Lernumgebung beurteilen zu können. Drei der 20 Probanden sind mittlerweile nicht mehr im Bildungskontext oder der Fachwissenschaft tätig. Dennoch sollten sie aufgrund ihres naturwissenschaftlichen Studiums und ihrer beruflichen Orientierung ein ausreichendes Vorwissen hinsichtlich der Stoff- und Teilchenebene besitzen und die Lernumgebung in ihrer Usability und mindestens in ihrer technischen Funktionalität beurteilen können.

6.2 Forschungsdesign und Durchführung der Vorstudie

Das Untersuchungsdesign stützt sich auf der Bearbeitung der Lernumgebung, dem Treatment, und der anschließenden Evaluation der AR-Lernumgebung. Die Akzeptanz und Usability der Lernumgebung wird als abhängige Variable verstanden (vgl. Bortz & Döring, 2016). Die digitale Vorbefragung zu den Einstellungen und Selbstwirksamkeitserwartungen hinsichtlich digitaler Medien und AR mit Naturwissenschafts- und Technologieexperten (N = 20) erstreckte sich über einen Zeitraum von zwei Monaten (Jan. – Feb. 2021). Die Testbearbeitung dauerte ca. 30 Minuten. Im März 2021 schlossen sich unter Berücksichtigung der Corona-Hygieneregeln die Testungen der AR-Lernumgebung in den Fachdidaktik-Laboren der TUM an (N = 18). Es wurden hierfür mit den Teilnehmenden individuelle Termine vereinbart. Die Versuchspersonen erhielten zu Beginn eine Sicherheitsunterweisung und wurden für die praktische Vertrautheit mit der AR-Technik in das Handling mit dem Tablet eingewiesen. Danach erfolgte die Interaktion mit der AR-Lernumgebung (ca. 30 min). Die Evaluation der AR-Lernumgebung zur Erfassung der Akzeptanz und Usability fand per digitalen Fragebogen am Ende einer jeden Testung mit 18 Versuchspersonen und einer Bearbeitungszeit von 30 Minuten statt.

6.3 Erhebungsinstrumente

Es werden für jede Skala die Anzahl der Items, die Itemformulierungen und das Antwortformat angegeben. Eine Übersicht aller Itemformulierungen findet sich im Anhang.

Mit dem Ziel die Lernwirksamkeit von innovativen Lernszenarien zu untersuchen, sollte vorab ihre Systemqualität und die Akzeptanz dieser bei Lehrkräften erfasst werden (vgl. Kapitel 5.1). Hierfür bedarf es spezifischer Erhebungsinstrumente, die sich gezielt mit den verschiedenen Facetten der Chemie- und Mediendidaktik auseinandersetzen. Jedoch existieren für die genannten Zwecke bisweilen keine anwendbaren Erhebungsinstrumente. Entsprechend wurden für die Erfassung der Merkmale des Individuums, d.h. die Einstellungen und Selbstwirksamkeitserwartungen bezüglich digitaler Medien und AR (vgl. Hauptstudie 1) sowie der Usability und Akzeptanz der AR-Lernumgebung zur Elektrolyse von Zinkiodid (vgl. Kapitel 6.4), bei Chemielehrkräften zwei Testinstrumente evidenzbasiert neukonstruiert. Dabei wurden zusätzlich demografische und organisatorische Daten wie Alter, Geschlecht, Beruf und Studium abgefragt.

Unter Bezugnahme der klassischen Testtheorie (vgl. Ziegler & Bühner, 2012; Bortz & Döring, 2016) werden im Folgenden die Fragebogenentwicklungen orientiert an der Itemkonstruktion und Skalierung (vgl. Lienert & Raatz, 1998) sowie dem Item-Antwortformat (vgl. Jonkisz et al., 2012) detailliert geschildert. Die hier angepassten Instrumente orientieren sich an einschlägiger Literatur, sodass Fragebogenart und -umfang weitgehend im Voraus feststanden. Schließlich wurden bei der Entwicklung der Fragebögen die Testgütekriterien „Objektivität“, „Validität“ und „Reliabilität“ als Instrument für die Beurteilung der Qualität von psychologischen Tests berücksichtigt (Lienert & Raatz, 1998; Moosbrugger & Kelava, 2012).

6.3.1 Fragebogen zur Erfassung der Einstellungen und Selbstwirksamkeit hinsichtlich digitaler Medien und AR

Mit dem Ziel die Merkmale des Individuums bei Chemielehrkräften (vgl. Hauptstudie 1) als mögliche Einflussfaktoren auf den Einsatz digitaler Werkzeuge im naturwissenschaftlichen Unterricht zu erfassen, soll ein objektiver Fragebogen (vgl. Jonkisz et al., 2012) eingesetzt werden. Da die Inhaltsvalidität bereits vor der Fragebogenentwicklung zu begutachten ist (vgl. Schmiemann & Lücken, 2014), werden für die Operationalisierung der Einstellungen und Selbstwirksamkeit hinsichtlich digitaler Medien und AR verschiedene theoretische Konstrukte gewählt und miteinander in Verbindung gesetzt (vgl. Lienert & Raatz, 1998). Es dienen vorrangig die Fragebögen von Vogelsang et al. (2019) und Graham et al. (2009) sowie die Testinstrumente von Naumann et al. (2001) und Bürg (2005) als Grundgerüst für die Fragebogenentwicklung. Dabei ist zu beachten, dass das Erhebungsinstrument von Vogelsang et al. (2019) mit sieben Konstrukten, von denen sich eines auf die Einstellungen und sich ein weiteres auf die Selbstwirksamkeit bezieht, eine sehr kurze Testlänge (10-15 min) besitzt. Angesichts der Forschungsfrage FF_{Pilot} in Kapitel 5.1 muss der Fragebogen zu den Einstellungen und Selbstwirksamkeitserwartungen hinsichtlich digitaler Medien auch für die technische Innovation AR spezifiziert werden. AR ist ein spezielles, digitales Werkzeug und kann daher als Subkategorie digitaler Medien angesehen werden. Items, die allgemeingültige Einschätzungen zur Digitalisierung im Unterricht fokussieren, müssen in dem Teil des Fragebogens, der sich auf AR bezieht, eliminiert werden, da sie redundant sind. Graham et al. (2009) binden zwar das TPACK-Modell ein, gehen aber entweder zu spezifisch in Form diverser Lernanwendungen oder zu oberflächlich hinsichtlich der Didaktik auf den Fachunterricht ein. Demzufolge müssen die bestehenden Items ausgebaut, modifiziert und mit Neuen angereichert werden. Folglich umfasst der resultierende Fragebogen vier Skalen *Einstellungen zu digitalen Medien*, *Einstellungen zu AR*, *Selbstwirksamkeitserwartungen zu digitalen Medien* und *Selbstwirksamkeitserwartungen zu AR*. Überdies werden drei inhaltlich klar umrissene Faktoren für das jeweilige Zielkonstrukt eingebunden: TPCK, TPK und Allgemeines bzw. TK werden als Subskalen operationalisiert (vgl. Bortz & Döring, 2016). Da sich der Fragebogen an den vier Per-

sonenmerkmalen orientiert, muss jedes Item die Einstellungen bzw. Fähigkeiten vor dem Hintergrund des TPACK-Modells erfassen (vgl. Köhler & Mishra, 2009; Schmiemann & Lücken, 2014). Da die Erhebungsinstrumente nach Vogelsang et al. (2019), Graham et al. (2009), Naumann et al. (2001) und Bürg (2005) valide und reliabel Personenmerkmale abbilden, wurde sich an deren geschlossenen Antwortformat orientiert. In Anlehnung an Vogelsang et al. (2019) verfügen alle Skalen über eine vierstufige Likert-Skala mit von 1: „trifft gar nicht zu“ bis 4: „trifft voll zu“. Nachdem es sich bei den Items, vor allem aufgrund der fachinhaltlichen Spezifizierungen, um teils komplexere Formulierungen handelt, wurden Negationen bereits bei der Itemkonstruktion eliminiert und Umpolungen, die sich zum Teil in den Urquellen befanden, weitgehend vermieden. Die (Sub-) Skalenbildung wird nachstehend detailliert beschrieben:

Einstellungen hinsichtlich digitaler Medien und AR. Es wurde auf die Skalen *Einstellung zum Lernen mit digitalen Medien im Unterricht* von Vogelsang et al. (2019) sowie, zur tiefergehenden Erfassung der Nützlichkeits einschätzung digitaler Medien, auf deren Urquelle, die allgemeingehaltene Skalen zu computerbezogenen Einstellungen bei Studierenden von Naumann et al. (2001), zurückgegriffen. Sie wurden bereits von Vogelsang et al. (2019) kontextuell für den naturwissenschaftlichen Unterricht modifiziert, indem fachübergreifend Überzeugungen zum gewinnbringenden Einsatz digitaler Medien für das Lernen von Schülern (z.B. zur Motivationssteigerung oder Schüleraktivierung) fokussiert wurden. Darauf basierend wurden die Konstrukte für das Unterrichtsfach Chemie erneut angepasst und für den Einsatz in Hauptstudie 1 (vgl. Kapitel 5.2) die Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) eingebunden (vgl. Kapitel 2.1). Der Schwerpunkt sollte nicht nur auf der Pädagogik liegen, sondern fachbezogen das Stoff-Teilchen-Konzept und angesichts dessen den Umgang mit der chemischen Fachsprache (vgl. Kapitel 3) einschließen. Damit neben den pädagogischen Einstellungen von Lehrkräften auch die fachdidaktischen Einschätzungen zum Gegenstandsbereich „Digitale Medien“ messbar werden, schloss sich eine Unterteilung in die Bereiche des TPACK-Modells (Köhler & Mishra, 2009) an (vgl. Kapitel 4.2.2). Nachdem sich die Items von Vogelsang et al. (2019) vorrangig der Dimension TPK zuordnen lassen, gewinnt nun vor allem die Kategorie TPCK an Bedeutung (vgl. Huwer et al., 2019). Es sollte daher vor dem Hintergrund der Merkmalsanalyse zur Entwicklung eines hoch inhaltlich validen Messinstruments zwischen den Ebenen TPCK und TPK differenziert werden (vgl. Moosbrugger, 2012). TCK und TK als Unterkategorien von TPCK (sowie TPK) können in Hinblick auf die Zumutbarkeit und Nützlichkeit der Konstrukte vernachlässigt werden. Die praktische Relevanz scheint hier aufgrund der außer Acht gelassenen (Fach-) Pädagogik nicht gegeben. Ferner würde eine zusätzliche Einbindung dieser Dimensionen die Probanden unnötig belasten (vgl. Moosbrugger & Kelava, 2012). Die Bearbeitungszeit des Fragebogens würde sich stark ausdehnen, sodass die Probanden vermutlich demotiviert werden und die Items nicht weiter konstruktgemäß beantworten (vgl. Jonkisz et

al., 2012). Eine Skala von Bürg (2005) zur Einstellungsakzeptanz wird zusätzlich für die Erfassung der Einstellungen bezogen auf die allgemeine Bedeutsamkeit der Technik im Beruf (Allg-E) genutzt. Die Messung dieses Submerkmals soll unabhängig von fachdidaktischen und pädagogischen Aspekten die individuellen Ansichten der Versuchspersonen widerspiegeln und damit eine tiefere Analyse erlauben. Die Einbindung digitaler Medien im Unterricht ist seit dem Beschluss der KMK (2017) und nicht zuletzt der Corona-Pandemie unausweichlich für Lehrkräfte. Die Bereitschaft diese tatsächlich auch einsetzen zu wollen und eine Sinnhaftigkeit in deren Funktionen für den eigenen Beruf zu sehen, kann von Vorgaben der Obrigkeit abweichen. Demzufolge werden auch diese allgemeinen, individuellen Ansichten erfasst.

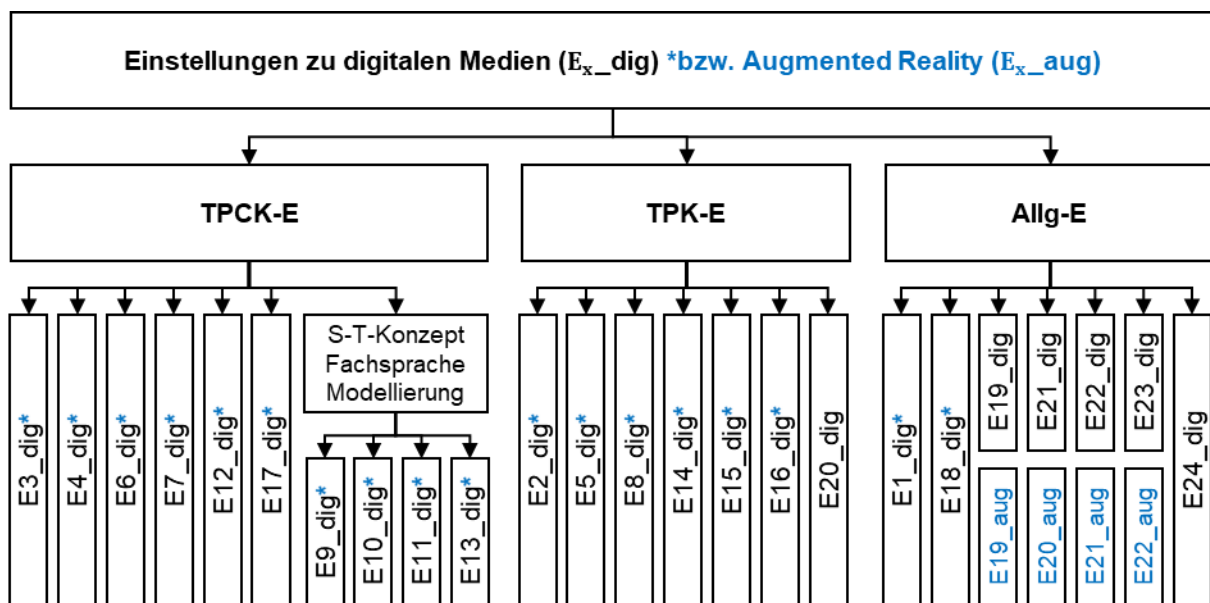


Abbildung 14. Operationalisierung der Einstellungen zu digitalen Medien (Itemabkürzung E_x_dig) bzw. AR (Itemabkürzung E_x_aug ; blau markiert).

Abbildung 14 liefert eine Übersicht der Operationalisierungen der Einstellungen zu digitalen Medien bzw. AR und ihren Subskalen TPCK-E, TPK-E und Allgemeines-E mit Itemaufschlüsselungen:

TPCK-E: Es wurden zehn Items konstruiert, von denen sich vier an Vogelsang et al. (2019) mit Fokus auf das Lernen im Chemieunterricht orientieren. Sechs Items wurden auf Basis des INCOBI-Instruments nach Naumann et al. (2001) entwickelt, die die chemiedidaktischen Inhalte ausdifferenziert beinhalten (s. Tabelle 4).

Tabelle 4. Übersicht der Items zur Erfassung der Einstellungen hinsichtlich digitaler Medien (TPCK-E) mit ihren Quellen und deren Modifizierungen anhand je eines Beispielitems.

TPCK-E-Item	Quelle	Bsp-Item aus Quelle	Modifiziertes Bsp-Item
E3_dig E4_dig E6_dig E7_dig	Adaptiert nach Vogelsang et al. (2019)	„Computer und digitale Medien eröffnen Spielräume für Kreativität beim Lernen.“	E4_dig „Digitale Medien eröffnen Spielräume für Kreativität beim Lernen chemischer Inhalte.“
E9_dig E10_dig E11_dig E12_dig E13_dig E17_dig	Adaptiert nach Naumann et al. (2001)	„Für mich ist der Computer ein nützliches Arbeitsmittel.“	E9_dig: „Für mich sind digitale Medien ein nützliches Arbeitsmittel zur Förderung des Stoff-Teilchen-Konzeptverständnisses im Chemieunterricht bzw. in Lehrveranstaltungen*.“

*Da sich die Stichprobe der Vorstudie vorrangig aus Naturwissenschafts- und Technologieexperten (wissenschaftliche Mitarbeiter) zusammensetzt, wurden adressatengerecht die Lehrveranstaltungen in die Items eingebunden.

TPK-E: Die Subskala zur Erfassung des technisch-pädagogischen Wissens (7 Items) ließ einen Übertrag dreier Items von Vogelsang et al. (2019) zu. Mit Blick auf die Unterrichtsmethodik wurden weitere drei Items nach Naumann et al. (2001) umkonstruiert. Auch auf Bürg (2005) wurde zurückgegriffen, indem aus einem allgemeingehaltenen Item zur Arbeitserleichterung Item E20_dig konzipiert wurde (vgl. Tabelle 5).

Tabelle 5. Übersicht der Items zur Erfassung der Einstellungen hinsichtlich digitaler Medien (TPK-E) mit ihren Quellen und deren Modifizierungen anhand je eines Beispielitems.

TPK-E-Item	Quelle	Bsp-Item aus Quelle	Modifiziertes Bsp-Item
E2_dig E5_dig E8_dig	Übernommen von Vogelsang et al. (2019)	E8_dig: „Digitale Medien erlauben eine höhere Schüleraktivierung.“	
E14_dig E15_dig E16_dig	Adaptiert nach Naumann et al. (2001)	„Für die Vermittlung mancher Lerninhalte kann der Computer sehr nützlich sein.“	E15_dig: „Der Einsatz digitaler Medien im Chemieunterricht bzw. in Lehrveranstaltungen kann das kooperative Arbeiten der Schüler*innen bzw. Student*innen fördern.“
E20_dig	Adaptiert nach Bürg (2005)	Es gibt viele Arbeiten, die ich mit dem Computer leichter und schneller verrichten kann als ohne.	E20_dig: „Es gibt viele Unterrichtsvorbereitungen, die ich mit digitalen Medien leichter und schneller verrichten kann als ohne.“

Allg-E: Die dritte Subskala stützt sich mit sieben Items auf den allgemeinen Einstellungen der Probanden, wenn es um die Nutzung digitaler Medien als Arbeitsmittel geht. Die Items wurden nach Vogelsang et al. (2019), Bürg (2005) und Naumann et al. (2001) adaptiert. Tabelle 6 zeigt die Zugehörigkeit der Items der Subskala Allg-E hinsichtlich der Einstellungen zu digitalen Medien mit ihren Quellen und exemplarischen Modifikationen auf.

Tabelle 6. Übersicht der Items zur Erfassung der Einstellungen hinsichtlich digitaler Medien (Allg-E) mit ihren Quellen und deren Modifizierungen anhand je eines Beispielitems.

Allg-E-Item	Quelle	Bsp-Item aus Quelle	Modifiziertes Bsp-Item
E1_dig	Adaptiert nach Vogelsang et al. (2019)	„Digitale Medien sollten generell in den Lehrplänen der Schulen ein starkes Gewicht erhalten.“	E1_dig: „Digitale Medien sollten generell in den Fachlehrplänen der Schulen bzw. Universitäten ein starkes Gewicht erhalten.“
E18_dig E19_dig	Adaptiert nach Naumann et al. (2001)	„Ich würde es begrüßen, wenn Computer und Neue Medien häufiger für Lehr- und Ausbildungszwecke genutzt würden.“	E18_dig: „Ich würde es begrüßen, wenn digitale Medien häufiger für Lehr- und Lernzwecke genutzt würden.“
E21_dig E22_dig E23_dig E24_dig	Adaptiert nach Bürg (2005)	„Ich finde Auseinandersetzungen mit Fragen des Fallbasierten Zugangs spannend.“	E22_dig: „Ich finde die Auseinandersetzung mit digitalen Medien für den Chemieunterricht spannend.“

Das Vorgehen bei der Operationalisierung der Einstellungen hinsichtlich AR erfolgte nahezu analog zu den Einstellungen hinsichtlich digitaler Medien. Überwiegend wurden Begrifflichkeiten wie „Digitale Medien“ in „Innovationen wie AR“ umformuliert. Aufgrund der Neuartigkeit der High-End-Technologie AR wurde von Innovationen und exemplarisch von AR gesprochen. So sollte eine höhere Antwortquote erreicht werden, insbesondere bei jenen Probanden, die bisweilen keine Berührungspunkte mit AR hatten. Abbildung 18 zeigt eine fast identische Struktur hinsichtlich der Itemanzahl und -aufteilung in den Subskalen bezogen auf digitale Medien und AR. Die blau markierten Items demonstrieren die deckungsgleiche Itemformulierung bezüglich AR, die auf denselben theoretischen Konstrukten wie bei den Einstellungen zu digitalen Medien fußen. In Subskala Allg-E sind nur zwei Items inhaltsgleich, wobei vier Items vor dem Hintergrund des innovativen Charakters der AR-Technik orientiert an Bürg (2005) neu konstruiert wurden (z.B.: Item „E22_aug: „Ich probiere gerne neue innovative, technische Anwendungen aus.“).

Selbstwirksamkeit hinsichtlich digitaler Medien und AR. Die Skalen zur Selbstwirksamkeit stützen sich auf Überzeugungen hinsichtlich der eigenen Fähigkeiten, verschiedene Werkzeuge (z.B. Lernvideos) im (naturwissenschaftlichen) Unterricht adäquat zu implementieren und sich des Mehrwerts der Einsatzformen bedienen zu können. Für die Operationalisierung der Selbstwirksamkeit wird auf die Skala zu den Selbstwirksamkeitserwartungen zum Einsatz digitaler Medien von Vogelsang et al. (2019) und die Skalen zu den Selbstwirksamkeitserwartungen im Umgang mit digitalen Medien bei MINT-Lehrkräften von Graham et al. (2009) zurückgegriffen. Das theoretische Konstrukt nach Graham et al. (2009) schlüsselt die Selbstwirksamkeit in die vier Elemente TPCK, TPK, TCK und TK auf und bekräftigt damit das oben beschriebene Vorgehen hinsichtlich der Subskalierung der Einstellungen. Analog zu den Einstellungen können die Items nun auf den Chemieunterricht angepasst und mit Blick auf die che-

miedidaktische sowie pädagogische Einschätzung in die Bereiche TPCK und TPK untergliedert werden. Im frühen Stadium des TPCK-Modells sollten Lehrkräfte TK erwerben (vgl. Kapitel 4.2.2). Demzufolge setzt TPCK die technologischen Fähigkeiten voraus. In Hinblick auf die Sinnhaftigkeit der Probandenantworten bei der Selbstwirksamkeit können wenige TK-Items zur Kontrolle herangezogen werden. Um einen besseren Eindruck der Einschätzungen hinsichtlich der rein technischen Fähigkeiten zu erhalten, werden Items von Bürg (2005) eingebunden. Die gesamte TK-Skala von Graham et al. (2009) scheint wenig nützlich, da sie zu differenziert auf einzelne digitale Werkzeuge eingeht und damit den Kontrollzweck verfehlt.

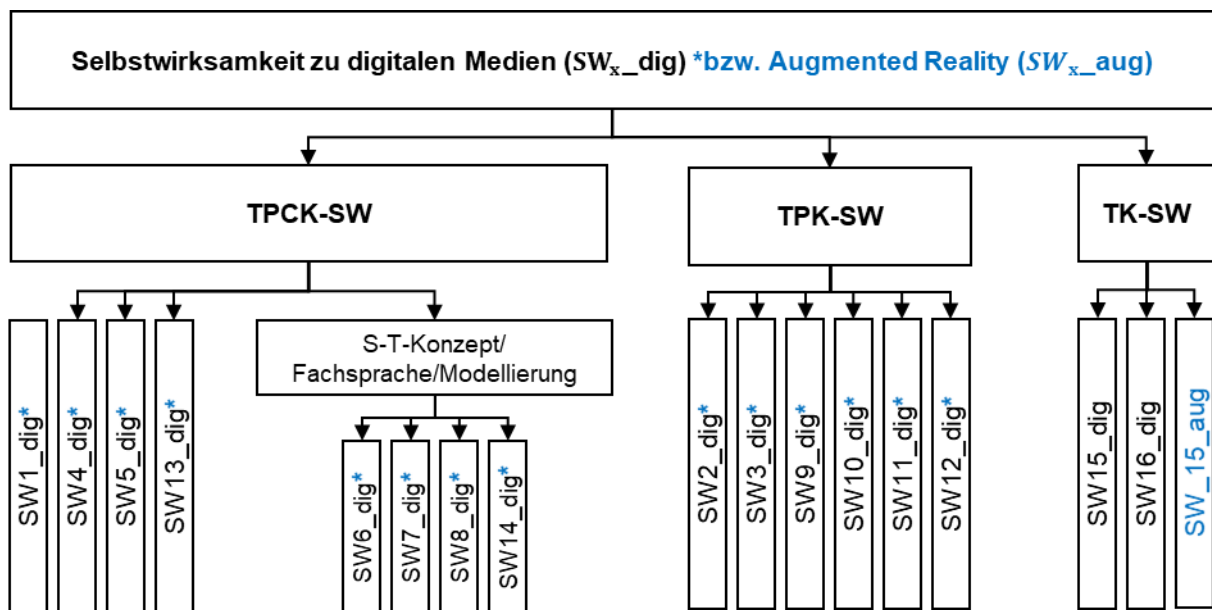


Abbildung 15. Operationalisierung der Selbstwirksamkeitserwartungen zu digitalen Medien bzw. AR (Itemabkürzung SW_x_{dig}) bzw. AR (Itemabkürzung SW_x_{aug} ; blau markiert).

Die Operationalisierung der Selbstwirksamkeit hinsichtlich digitaler Medien und AR erfolgte analog zu den Einstellungen. Diese wird in Abbildung 15 zusammenfasst:

TPCK-SW: Entsprechend der Einstellungen wurden die acht Items der Subskala TPCK-SW in vier allgemeine Items und vier spezifizierende Items bezüglich des Stoff-Teilchen-Konzepts, der chemischen Fachsprache und der chemischen Modellierung untergliedert (vgl. Abbildung 15). Erneut wurden marginale Anpassungen nach Vogelsang et al. (2019) wie in Item SW5_dig (vgl. Tabelle 7) durch Ergänzung des Fachbezugs vorgenommen. Mit Blick auf das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis und den Umgang mit der chemischen Fachsprache wurden mit den Items nach Graham et al. (2009) inhaltliche Modifizierungen beabsichtigt (vgl. Tabelle 7). Prinzipiell stützen sich manche Itemmodifizierungen auf beiden Quellen. Vogelsang et. al. (2019) binden beispielweise mit Item G7 „*Ich bin grundsätzlich in der Lage, Augmented Reality-Anwendungen zielgerichtet im Unterricht einzusetzen.*“ zur Erfassung der Selbstwirksamkeit den Chemieunterricht sowie das Werkzeug AR (vgl. Itemkonstruktion der Skalen hinsichtlich AR) konkret ein.

Tabelle 7. Übersicht der Items zur Erfassung der Selbstwirksamkeitserwartungen hinsichtlich digitaler Medien (TPCK-SW) mit ihren Quellen und deren Modifizierungen anhand je eines Beispielitems.

TPCK-SW-Item	Quelle	Bsp-Item aus Quelle	Modifiziertes Bsp-Item
SW1_dig SW4_dig SW5_dig SW6_dig SW7_dig SW8_dig SW14_dig	Adaptiert nach Vogelsang et al. (2019)	SW5_dig: „ <i>Ich bin grundsätzlich in der Lage digitale Medien zielgerichtet im Chemieunterricht bzw. in Lehrveranstaltungen einzusetzen.</i> “	
SW6_dig SW7_dig SW8_dig SW13_dig SW14_dig	Adaptiert nach Graham et al. (2009)	„ <i>Help students use digital technologies that extend their ability to observe scientific phenomenon.</i> “	SW7_dig: „ <i>Ich weiß worauf ich achten muss, wenn ich mithilfe digitaler Medien die fachsprachliche Kompetenz der Schüler*innen bzw. Student*innen im/n CU/LVen fördern möchte.</i> “

TPK-SW: Die Subskala TPK-SW setzt sich aus sechs Items zusammen (vgl. Abbildung 15). Analog zu der Subskala bezüglich der Einstellungen konnten Items wie SW3_dig (vgl. Tabelle 8) von Vogelsang et al. (2019) übernommen werden. Die meisten Itemmodifizierungen wurden auf Basis der TPK-Skala von Graham et al. (2009) unter Berücksichtigung von Vogelsang et al. (2019), vorgenommen. Tabelle 8 gibt eine entsprechende Übersicht mit zugehörigen Itemmodifizierungen.

Tabelle 8. Übersicht der Items zur Erfassung der Selbstwirksamkeitserwartungen hinsichtlich digitaler Medien (TPK-SW) mit ihren Quellen und deren Modifizierungen anhand je eines Beispielitems.

TPK-SW-Item	Quelle	Bsp-Item aus Quelle	Modifiziertes Bsp-Item
SW2_dig SW3_dig	Adaptiert nach Vogelsang et al. (2019)	„ <i>Ich selbst kann digitale Medien sinnvoll einsetzen, um Feedback von meinen SchülerInnen zum Unterricht zu erhalten.</i> “	SW3_dig: „ <i>Ich selbst kann digitale Medien sinnvoll im Chemieunterricht bzw. in Lehrveranstaltungen einsetzen, um Feedback von den Schüler*innen bzw. Student*innen zu erhalten.</i> “
SW9_dig SW10_dig SW11_dig SW12_dig	Adaptiert nach Vogelsang et al. (2019) und Graham et al. (2009)	„ <i>Use digital technologies to motivate learners.</i> “	SW9_dig: „ <i>Es fällt mir leicht, digitale Medien zum Zwecke der Motivationssteigerung im/n CU/LVen einzusetzen.</i> “

TK-SW: Die Subskala TK-SW, welche inhaltlich eine Voraussetzung für TP(C)K darstellt, wird zur Kontrolle im Hinblick auf die Einschätzung der eigenen technischen Fähigkeiten in den Fragebogen aufgenommen. Es handelt sich dabei um zwei Items hinsichtlich der digitalen Medien (z.B. Item SW15_dig: „*Bei auftretenden technischen Schwierigkeiten benötige ich meist keine Hilfe von anderen Leuten.*“ adaptiert nach Bürg, 2005), die zur Bekräftigung von TPCK betrachtet werden.

Abbildung 15 zeigt in der Gesamtansicht auf, dass sich die Items der (Sub-) Skalen zwischen den digitalen Medien und AR kaum unterscheiden und bei AR analog zu dem bei den Einstellungen beschriebenen Vorgehen konstruiert wurden. Einziger Unterschied zeigt sich in der TK-SW-Skala. Die Dimension AR listet nur ein Item SW1_aug (s. Abbildung 15) mit der Formulierung „Die technische Verwendung unbekannter innovativer Softwareprogramme kann ich schnell erlernen.“ auf.

6.3.2 Fragebogen zur Erfassung der Akzeptanz und Usability

Der Usability-Test wurde für das konkrete Kriterium „AR zur Förderung des Stoff-Teilchen-Konzeptverständnisses und des Umgangs mit (M)ER am Beispiel Redoxreaktionen (Zinkiodid-Elektrolyse)“ entwickelt. Die Operationalisierung der Akzeptanz erfolgt auf Basis der theoretischen Konstrukte von Kopp et al. (2003) und Simon (2001). Die Akzeptanz zur Überprüfung der allgemeinen Zufriedenheit der Nutzer mit der AR-Lernumgebung ist als eindimensionales Merkmal anzusehen (vgl. Jonkisz et al., 2012). Zur Erfassung der Usability wird auf bestehende Skalen verschiedener Instrumente zurückgegriffen, die folglich eine feingliedrige Unterteilung des Merkmals Usability in mehrere Subskalen nach sich ziehen. Laut EN ISO 9241-110 (2020; vgl. Prümper, 2008) sollte sich die Usability eines Technologiesystems auf sieben Grundprinzipien stützen. Dabei handelt es sich um die Aufgabenangemessenheit, Selbstbeschreibungsfähigkeit, Steuerbarkeit, Erwartungskonformität, Individualisierbarkeit, Fehlerrobustheit und Lernförderlichkeit (Figl, 2010; vgl. Kapitel 4.4.2). Abhängig von den jeweiligen Rahmenbedingungen wie Nutzer, Aufgabenbereich usw. können die Grundprinzipien je nach Untersuchungsmerkmal unterschiedlich stark in den Entwicklungsprozess des Fragebogens einbezogen werden. Da der Fokus aus fachdidaktischer Perspektive auf der Gestaltung einer innovativen Lernumgebung für den Chemieunterricht (vgl. Kapitel 6.4) liegt, steht ihre Konzeption im Vordergrund. Es müssen neben technischen und funktionalen Komponenten auch Merkmale zur chemie- und mediendidaktischen sowie methodischen Gestaltung der AR-Lernumgebung integriert werden (vgl. Reinmann-Rothmeier & Mandl, 2001). Diesem Anspruch kann der Fragebogen Isonorm 9241/110⁴ nicht gerecht werden (Prümper, 2008). Daher wird auf die theoretischen Konstrukte wie jenen von Kopp et al. (2003), Bürg (2005) und Wolf et al. (2020) zurückgegriffen. Sie alle erfassen die Usability einer Technologie mit Blick auf den Lehr- und Lernprozess und fokussieren damit die Systemqualität einer digitalen Lehr- und Lernwendung. Dabei bleibt die technische Funktionalität nicht unberücksichtigt. Aufgrund der Verknüpfung von realem Versuchsaufbau mit virtueller Lernumgebung wird die Usability multiperspektivisch operationalisiert: Bei der Entwicklung der AR-Lernumgebung (Kapitel 6.4) liegt ein besonderes Augenmerk auf der inhaltlichen Umsetzung hinsichtlich des Umgangs mit (M)ER auf Stoff- und Teilchenebene. Einerseits rückt der Fachinhalt Redoxreaktionen am Beispiel der

⁴ Im Folgenden Isonorm abgekürzt

Zinkiodid-Elektrolyse eigens in den Vordergrund und muss folglich aus verschiedenen Dimensionen wie voraussichtlicher Motivation oder Lernerfolg betrachtet werden. Andererseits ist es die mediendidaktische Gestaltung mittels differenzierter Einbindung von Text, Symbol und Bild, die hinsichtlich der Lernwirksamkeit als Lehr- und Lernwerkzeug begutachtet werden muss. Es bietet sich an, eine Auswahl der eher technisch-basierten Gestaltungsanforderungen des Isonorm-Fragebogens zu treffen und diese mit den Dimensionen zur medialen und didaktischen Gestaltung von Kopp et al. (2003) und Bürg (2005) auszubauen. Eine zusätzliche Anreicherung kann nebens mit dem theoretischen Konstrukt von Wolf et al. (2020) erfolgen. Anschließend werden die Dimensionen mit Blick auf die zu untersuchende AR-Lernumgebung (s. Kapitel 6.4) für das Fach Chemie konkretisiert. Dementsprechend wird ein Fragebogen mit folgenden 13 Zieldimensionen entwickelt: 1. Akzeptanz, 2. Zielexplication, 3. Angemessenheit der Anforderungen, 4. Individualisierbarkeit, 5. Problemorientierte Didaktik, 6. Steuerbarkeit, 7. Selbsterklärungsfähigkeit, 8. Erwartungskonformität, 9. Verständlichkeit der Medien, 10. Wirkung der Medien, 11. Technische Lernförderlichkeit, 12. Voraussichtliche Motivation, 13. Voraussichtlicher Lernerfolg/Lerntransfer. Analog zu dem Fragebogen zur Erfassung der Personenmerkmale wurde eine vierstufige Likert-Skala mit verbaler Skalenbezeichnung (1: „trifft gar nicht zu“ bis 4: „trifft voll zu“) gewählt.

Um die Eignung der AR-Lernumgebung mit Blick auf die Forschungsfragen FF_{Pilot} (s. Kapitel 5.1) sorgfältig zu analysieren, können ergänzend Fragen im freien Antwortformat in das Instrument integriert werden. Die Ergebnisse der geschlossenen Skalen sollten zwar Hinweise liefern, wie das Konzept der AR-Lernumgebung eingeschätzt wird, die Antworten zu den offenen Fragen sollen diese inhaltlich unterstützen. Mit Blick auf die Modifikation der AR-Lernumgebung können offene Fragen nützlich sein, den Optimierungsbedarf umfassender als es gegebenenfalls mit den Skalen möglich ist, aufzudecken. Insbesondere die Ergänzung konkreter Lösungsvorschläge sollte sich äußerst hilfreich für die Weiterentwicklung der AR-Lernumgebung zeigen. Da die Probanden die Antworten selbst produzieren (Jonkisz et al., 2012), werden Fehler näher analysiert und persönliche Meinungen, Vorschläge, Ideen, Wünsche oder Anregungen zur AR-Lernumgebung genannt. Vor allem in Hinblick auf die technische Umsetzung wird erwartet, dass sie einen wertvollen Beitrag zur Modifikation des AR-Settings liefern. Folglich werden, orientiert an Wolf et al. (2020), 11 Fragen zur tiefergehenden Evaluation der App formuliert, deren Aussagen überdies mit den Itemantworten kombiniert werden können.

Zusammenfassend wird festgehalten, dass die Operationalisierung der Akzeptanz ohne Aufgliederung in weitere Subskalen erfolgt. Im Vergleich dazu muss die Usability der AR-Lernumgebung mehrdimensional erfasst werden. Hierbei wird zwischen den drei Subskalen *Didaktische Gestaltungskriterien*, *Mediendidaktische Gestaltungskriterien* und *Didaktik: Schultransfer* differenziert. Abbildung 16 liefert eine Übersicht der Haupt- und Subskalen mit ihren Zieldimensionen und zugehörigen Itemanzahlen:

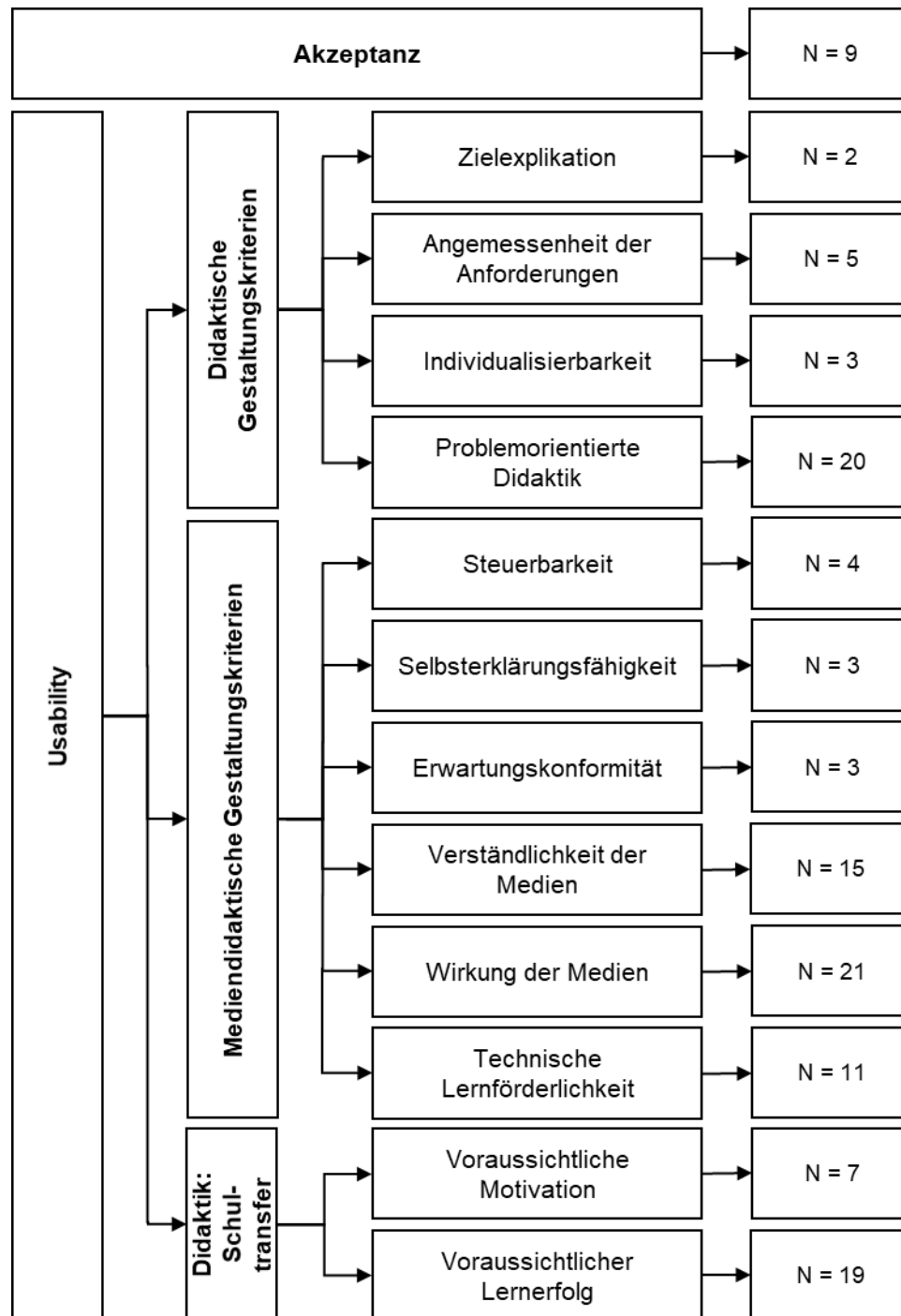


Abbildung 16. Operationalisierung der Akzeptanz und Usability der AR-Lernumgebung zur Elektrolyse von Zinkiodid; Anzahl der Items einer Skala (N).

Nachstehend werden die Akzeptanz und die Subskalen zur Usability mit ihren Zieldimensionen vorgestellt und hinsichtlich ihrer Itemaufschlüsselungen erläutert.

Akzeptanz. Die Ausbildung des Konstrukts Akzeptanz beruht darauf, dass die Lehrkräfte Aussagen zu ihrer allgemeinen Zufriedenheit mit der AR-Lernumgebung tätigen. Wird das Lehr- und Lernangebot von den Probanden angenommen, ist eine wichtige Prämisse für den perspektivischen Einsatz der Anwendung im Fachunterricht erfüllt (vgl. Kopp et al., 2003). Für die

Operationalisierung der Akzeptanz wurden daher neun Items konstruiert. Bei der Itemkonstruktion wurde die Nützlichkeit der AR-Lernumgebung für den Wissensaufbau zum Thema Elektrolyse von Zinkiodid fokussiert. Demzufolge galt es mehrere Aussagen in Hinblick auf das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis oder den Umgang mit der chemischen Fachsprache (vgl. Kapitel 2 und 3) zu formulieren. Überdies werden Items hinsichtlich des Transfers auf andere schulische Themengebiete wie Medienkonzept oder Austausch im Kollegium, der durch die Akzeptanz sichergestellt wird (vgl. Eppler & Mickeler, 2003), erstellt. Die Skala zur Akzeptanz wurde nach Kopp et al. (2003) adaptiert, mit zwei Items von Simon (2001) erweitert und auf die Inhalte AR-Lernumgebung angepasst. Tabelle 9 listet die Items mit zugehörigen Quellen und exemplarischer Itemmodifizierung auf. Der in der Skala verwendete Akzeptanzbegriff stützt sich, in Anlehnung an Goodhue (1995), auf der Einstellungsakzeptanz (vgl. Kapitel 4.4.2).

Tabelle 9. Item-Übersicht der Skala Akzeptanz mit Quelle und Modifizierung.

Akzeptanz			
Item	Quelle	Bsp-Item aus Quelle	Modifiziertes Bsp-Item
A1 ... A7	Adaptiert nach Kopp et al. (2003)	„Die Darstellung der Selbstlerneinheiten fand ich für das Verständnis hilfreich.“	A4: „Die AR-Lernumgebung fand ich für den Umgang mit den unterschiedlichen chemischen Repräsentationsformen hilfreich.“
A8 A9	Adaptiert nach Simon (2001)		

Usability; Didaktischen Gestaltungskriterien. Die didaktischen Gestaltungskriterien erlangen eine zentrale Rolle bei der Entwicklung digitaler Lehr- und Lernwerkzeuge (vgl. Reinmann-Rothmeier & Mandl, 2001) und damit besonders auch bei der Beurteilung ihrer Usability. Um die didaktischen Aufbereitungen der digitalen Lernanwendung erfassen zu können, sollten laut Kopp et al. (2003) die mit dem Medieneinsatz verbundenen Ziele klarwerden. Ferner gewinnt vor dem Hintergrund der interaktiven Möglichkeiten von Apps das selbstregulierte Lernen an Bedeutung. Damit der Nutzer bzw. Lernende nicht überfordert wird, muss zugleich die instruktionale Unterstützung der Lernanwendung betrachtet werden (vgl. Kopp et al., 2003; Reinmann-Rothmeier & Mandl, 2001a). Nur so kann überprüft werden, ob die Anforderungen an den Nutzer der Lernanwendung angemessen sind (vgl. Prümper, 2008). Angesichts dessen zeigt sich die problemorientierte Gestaltung von digitalen Lehr-Lernangeboten nützlich (vgl. Kopp et al., 2003). Folglich werden der didaktischen Gestaltung als Subskala vier Dimensionen *Zielexplikation* (2 Items), *Angemessenheit der Anforderungen* (5 Items), *Individualisierbarkeit* (3 Items) und *Problemorientierte Didaktik* (20 Items) untergeordnet. Tabelle 10 gibt eine Übersicht der Subskala mit ihren Zieldimensionen und Items sowie den entsprechenden Quellen und Modifizierungen.

Tabelle 10. Item-Übersicht der Subskala Didaktische Gestaltungskriterien der Usability mit den Dimensionen Zielexplikation, Angemessenheit der Anforderungen, Individualisierbarkeit und Problemorientierte Didaktik mit Quelle und Modifizierung.

Didaktische Gestaltungskriterien			
Item	Quelle	Bsp-Item aus Quelle	Modifiziertes Bsp-Item
Zielexplication			
Z1	Adaptiert nach Kopp et al. (2003)	„Die Lehr-Lernziele wurden explizit formuliert.“	Z1: „Die Lehr- und Lernziele der AR-Lernumgebung wurden explizit formuliert.“
Z2			
Angemessenheit der Anforderungen			
Ang_Anf1	Orientiert an Isonorm ISO 9241/110 (nach Prümper, 2008)	„SW bietet gute Möglichkeiten, sich häufig wiederholende Bearbeitungsvorgänge zu automatisieren.“	Ang_Anf3: „Die AR-Lernumgebung bietet gute Möglichkeiten, sich häufig wiederholende Bearbeitungsvorgänge zu automatisieren.“
...			
Ang_Anf3			
Ang_Anf4	Adaptiert nach Bürg (2005)		
Ang_Anf5			
Individualisierbarkeit			
I1	Orientiert an Isonorm ISO 9241/110 (nach Prümper, 2008)	I3: „Die Möglichkeiten, die Lerngeschwindigkeit ausreichend an meine individuellen Bedürfnisse anzupassen, sind gegeben.“	
I2			
I3	Übernommen von Bürg (2005)		
Problemorientierte Didaktik			
PDid1	Adaptiert nach Kopp et al. (2003)	„Die Elektrolyse von Zinkiodid wird aus verschiedenen fachdidaktischen Blickwinkeln betrachtet.“	PDid12: „Der Inhalt wird aus verschiedenen Blickwinkel betrachtet.“
...			
PDid17			
PDid18	Adaptiert nach Bürg (2005)		
...			
PDid20			

Usability; Mediendidaktischen Gestaltungskriterien. Mediendidaktik setzt sich mit der Wahl, dem Unterrichtseinsatz, den Entwicklungs- und Gestaltungsprozessen sowie den Effekten von Lehr- und Lernanwendungen auseinander und konzentriert sich dabei auch auf deren Funktionen (vgl. Witt & Czerwionka, 2013). Demnach sollte aus technischer Perspektive auch die Funktionalität der AR-Lernumgebung überprüft werden. Orientiert an den Grundprinzipien des Isonorm-Testinstruments wurden daher die drei Dimensionen Steuerbarkeit, Selbsterklärungsfähigkeit und Erwartungskonformität mit jeweils drei bis vier Items konstruiert (vgl. Tabelle 11). Sie umfassen Aussagen zur Bedienung und Orientierung in der Lernumgebung. Eine vierte Zieldimension, in Anlehnung an Prümper (2008), Bürg (2005) und Wolf et al. (2020), fußt auf dem Grundprinzip der Lernförderlichkeit (vgl. Prümper, 2008) und wurde mit Blick auf die Hilfsfunktionen der Lernumgebung in den Fragebogen aufgenommen (Figl, 2010). Mit insgesamt 11 Items zielt die Dimension *Technische Lernförderlichkeit* auf die Navigation in der Lernanwendung ab (vgl. Tabelle 11).

Tabelle 11. Item-Übersicht der Subskala Mediendidaktische Gestaltungskriterien der Usability mit den Dimensionen Steuerbarkeit, Selbsterklärungsfähigkeit, Erwartungskonformität, Verständlichkeit und Wirkung der Medien mit Quelle und Modifizierung.

Mediendidaktische Gestaltungskriterien			
Item	Quelle	Bsp-Item aus Quelle	Modifiziertes Bsp-Item
Steuerbarkeit			
St1	Orientiert an Isonorm ISO 9241/110 (nach Prümper, 2008)	„SW ermöglicht einen leichten Wechsel zwischen einzelnen Menüs oder Masken.“	St4: „Die AR-Lernumgebung ermöglicht einen leichten Wechsel zwischen und in den einzelnen Lernpfaden.“
...			
St4			
Selbsterklärungsfähigkeit			
Se_E1	Orientiert an Isonorm ISO 9241/110 (nach Prümper, 2008)	„SW verwendet gut verständliche Begriffe, Bezeichnungen, Abkürzungen oder Symbole in Masken und Menüs.“	Se_E2: „Die AR-Lernumgebung verwendet gut verständliche Bedienelemente (z.B. „Weiter“ Button), Begriffe, Bezeichnungen, Abkürzungen oder Symbole in den Masken und Menüs der Lernpfade.“
...			
Se_E3			
Erwartungskonformität			
EK1	Orientiert an Isonorm ISO 9241/110 (nach Prümper, 2008)	„SW reagiert mit gut vorhersehbaren Bearbeitungszeiten.“	EK2: „Die AR-Lernumgebung reagiert mit gut vorhersehbaren Bearbeitungszeiten.“
...			
EK3			
Verständlichkeit der Medien			
Ver_Me1	Adaptiert nach Kopp et al. (2003)	„Text und Bilder sind inhaltlich aufeinander bezogen.“	Ver_Me9: „Die Repräsentationsformen sind sinn- bzw. sachverhaltszusammenhängend auf dem Bildschirm angeordnet.“
...			
Ver_Me11	Adaptiert nach Wolf et al. (2018)		
Ver_Me12			
...			
Ver_Me15			
Wirkung der Medien			
Wirk_Me1	Adaptiert nach Kopp et al. (2003)	„Die mediale Gestaltung der Selbstlerneinheit war für das Lernen hilfreich.“	Wirk_Me12: „Die Symbole sind für das Verständnis von Redoxreaktionen bzw. der Elektrolyse von Zinkiodid auf Stoff- und Teilchenebene hilfreich.“
...			
Wirk_Me21			
Technische Lernförderlichkeit			
Tech_LF1	Orientiert an Isonorm ISO 9241/110 (nach Prümper, 2008)	„Ich wusste stets, wie ich Hilfestellungen zum Lösen der Aufgaben bekomme.“	Tech_LF7: „Ich wusste stets, wann ein Lernpfad beendet war.“
Tech_LF2			
...			
Tech_LF3	Orientiert an Wolf et al. (2018)		
...			
Tech_LF5			
Tech_LF11			
Tech_LF6	Orientiert an Bürg (2005)		
...			
Tech_LF10			

Im Zusammenhang mit der Entwicklung einer fachbezogenen AR-Lernumgebung (vgl. Kapitel 6.4.1) sollte aber nicht nur die Funktionalität betrachtet werden. Abgelöst von der rein technischen Perspektive setzt sich die Mediendidaktik laut Hüther (2005) mit den Entwicklungs-, und Gestaltungsprozessen von digitalen Werkzeugen für das Lehren und Lernen auseinander (vgl. Mayrberger & Kumar, 2014). Zwangsläufig ist die interdisziplinäre Betrachtung aus medienpädagogischer und allgemeindidaktischer Perspektive sinnvoll (vgl. Mayrberger & Kumar, 2014;

Tulodziecki, 2010; Kerres, 2012). Dies gilt vor allem für die didaktische Evaluation und Reflexion der Gestaltung einer fachbezogenen Lernanwendung (vgl. Mayrberger & Kumar, 2014; vgl. Tulodziecki et al., 2010). In der Lernumgebung kommt den AR-Repräsentationsformen eine tragende Rolle zu. Entsprechend sollten die Texte und Symbole, gemäß Kopp et al. (2003), hinsichtlich ihrer Länge, ihres Layouts, den Hervorhebungen und Formulierungen auf ihre Qualität geprüft werden. Ferner müssen neben Text, Symbol zusätzlich die dreidimensionalen Animationen zur Darstellung von komplexen Phänomenen wie den chemischen Teilchenbewegungen auf ihre Wirkung und Qualität geprüft werden (vgl. Kopp et al., 2003). Für eine umfassende Untersuchung der (M)ER in ihren Erscheinungs- und Wirkungsformen wurden daher die Zieldimensionen *Verständlichkeit der Medien* mit 15 Items und *Wirkung der Medien* mit 21 Items operationalisiert (vgl. Tabelle 11).

Usability; Didaktik: Schultransfer. Da es sich bei den Probanden um Chemielehrkräfte (vgl. FF_{Pilot} in Kapitel 5.1) und damit um Experten hinsichtlich der Redoxreaktionen handelt, wird durch die Lernanwendung nur ein geringer Wissenszuwachs hinsichtlich des Fachwissens erwartet. Die Lernumgebung kann aber vor allem auch zur Erweiterung fachlicher Kompetenzen eingesetzt werden, wenn es um das Thema Redoxreaktionen geht. Daher sollen die Chemielehrkräfte die AR-Lernanwendung bezüglich des Transfer in die Schule evaluieren. Mithilfe der Zieldimensionen *Voraussichtliche Motivation* (7 Items) und *Voraussichtlicher Lernerfolg* (19 Items) soll die Qualität der AR-Lernumgebung explizit auf die zu erwartenden Lernprozesse bei Schülern analysiert werden (vgl. Tabelle 12).

Tabelle 12. Item-Übersicht der Subskala Didaktik: Lernprozess der Usability mit den Dimensionen Voraussichtliche Motivation und Voraussichtlicher Lernerfolg mit Quelle und Modifizierung.

Didaktik: Schultransfer			
Item	Quelle	Bsp-Item aus Quelle	Modifiziertes Bsp-Item
Voraussichtliche Motivation			
M1 ... M4	Adaptiert nach Wolf et al. (2018)	„Die App weckte meine Neugier am Lerninhalt.“	M6: „Die AR-Lernumgebung weckt bei Lernenden voraussichtlich die Neugier an Redoxreaktionen auf Stoff- und Teilchenebene.“
M5 ... M7	Adaptiert nach Bürg (2005)		
Voraussichtlicher Lernerfolg			
Le_LT1 ... Le_LT12 Le_LT19	Adaptiert nach Kopp et al. (2003)	„Durch die Selbstlerneinheit habe ich mir Wissen über ... angeeignet.“	Le_LT7: „Durch die AR-Lernumgebung können sich Lernende voraussichtlich Wissen zum chemischen Modellieren aneignen.“
Le_LT13 ... Le_LT18	Adaptiert nach Bürg (2005)		

Die Items der Zieldimension *Lernerfolg* sollen erheben, inwiefern Lernende mit der AR-Anwendung ihr bestehendes Wissen vertiefen und neues erwerben sowie für zukünftige Themengebiete kumulativ anwenden können. Die Items berücksichtigen daher neben dem Fachinhalt „Redoxreaktion“ auch das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis, den Umgang mit (M)ER und das Modellieren.

Offene Fragen. Um die AR-Lernumgebung bestmöglich weiterentwickeln zu können, wurden zusätzlich 11 Fragen im offenen Antwortformat in den Usability-Test integriert, die die Ergebnisse aus der deskriptiven Analyse stützen sollen. Ihr Informationsgehalt sollte vor allem auf Lösungsvorschlägen zur inhaltlichen Modifikation und technischen Umsetzung der App fußen. Die Konstruktion der offenen Fragen orientiert sich an Wolf et al. (2020) und zielt auf die tiefergehende Qualitätsprüfung der AR-Lernumgebung ab. Drei Facetten sollen die Meinungen, Optimierungsvorschläge und Ideen der Lehrkräfte zur Lernanwendung erfassen

- a) Fünf allgemeingültige Fragen (Bsp.-Frage: *„Beschreiben Sie, was Ihnen aus fach- und mediendidaktischer Sicht besonders gut an der AR-Lernumgebung gefallen hat.“*).
- b) Drei Fragen zum Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis (Beispielfrage: *„Reflektieren Sie, ob Sie die AR-Lernumgebung motiviert hat, sich bewusst mit dem Wechsel von Stoff- auf Teilchenebene auseinanderzusetzen.“*).
- c) Drei Fragen zum Umgang mit (M)ER (Bsp.-Frage: *„Erklären Sie, welche Informationen in der AR-Lernumgebung fehlen, um die verschiedenen chemischen Repräsentationsformen und ihre Wechsel ineinander besser zu verdeutlichen?“*)

6.4 Gestaltung der AR-Lernumgebung

Das augmentierte Wahrnehmen von chemischen Prozessen am Beispiel von Schulexperimenten ist aus Sicht der Bildungswissenschaften ein wenig erforschtes Gebiet (Maier, 2014; Huwer et al., 2019; Lauer & Peschel, 2023). Um das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis und den Umgang mit der chemischen Fachsprache mittels AR valide zu erfassen, wurde in Anlehnung an das Modell zur Entwicklung einer digitalen Lernumgebung für den Mathematikunterricht nach Reinhold (2019) eine AR-Lernumgebung für den Chemieunterricht konzipiert. Dabei wurde auf vier Kernelemente geachtet, die nachstehend beschrieben werden (vgl. Abbildung 17). Hinsichtlich der beiden Förderschwerpunkte war es notwendig, konkrete Wechsel zwischen Stoff- und Teilchenebene mittels (M)ER einzubauen (vgl. Johnstone, 1993, 2000; Talanquer, 2011). In diesem Zusammenhang wurde ein exemplarischer Fachinhalt gewählt, der in den Lehrplänen des Gymnasiums in Bayern verankert ist (KMK, 2023c) und sich besonders zur Verdeutlichung des zu betrachtenden Konstrukts „Stoff-Teilchen-Ebenenwechsel“ eignet. Das Donator-Akzeptor-Konzept erlaubt eine Augmentierung von Teilchenprozessen, die aussagekräftig für vergleichbare Themen sein sollte und damit kumulatives Lernen ermöglicht. Redoxreaktionen am Beispiel der Elektrolyse von Zinkiodid sollten sich als bedeutungsvolles Thema aus

der Chemie eignen, um die Teilchenbewegungen vor und während des Reaktionsablaufes am realen Versuch zu veranschaulichen. Schließlich stützte sich die konzeptionelle Gestaltung der Lernumgebung auf Basis des Dreiecks nach Johnstone (1993, 2000) auf die in Kapitel 3.3 beschriebenen theoretischen Inhalte zum Text-Bild-Verständnis nach Schnotz (2001), zur Cognitive Load-Theorie nach Sweller (2011) sowie zur Theorie des multimedialen Lernens nach Mayer (2002) mit ihren Gestaltungsprinzipien zur Kontiguität (Fiorella & Mayer, 2021) und zum Split-Attention-Effekt (Ayres & Sweller, 2021). Da sich durch AR der reale Versuchsaufbau mit virtuellen Modellen verknüpfen lässt, war eine nutzerfreundliche Konzeption (Usability) der innovativen Lernumgebung erforderlich. Neben (medien-) didaktischen Aspekten wurden daher auch funktionale Gestaltungskriterien fokussiert und die Lernumgebung in Bezug auf den zukünftigen Einsatz im Chemieunterricht fachlich und didaktisch adäquat aufbereitet. Die vier – nicht immer trennscharfen Segmente des Modells zur Entwicklung der AR-Lernumgebung für den Chemieunterricht werden in den folgenden Abschnitten näher erläutert. Häufig sind die Bereiche ineinander verzahnt und überschneiden sich (vgl. Reinhold, 2019).

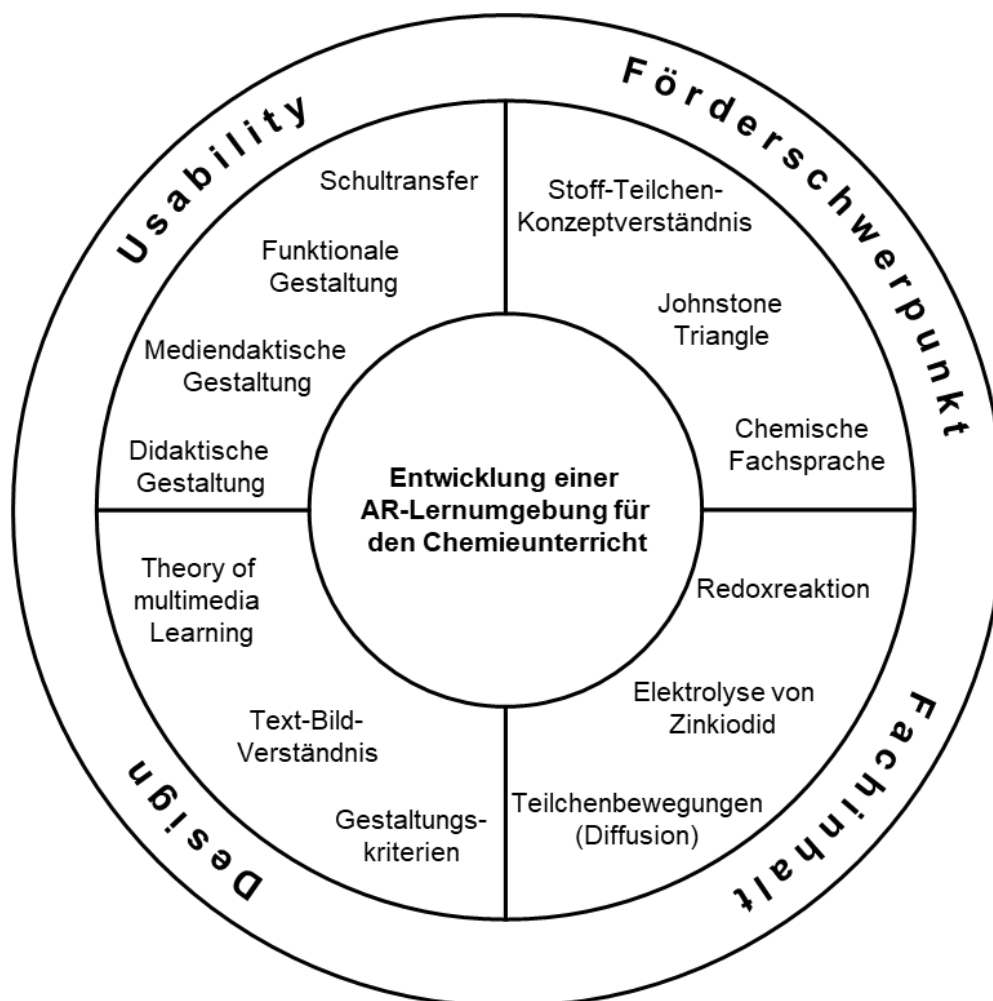


Abbildung 17. Modell zur Entwicklung einer AR-Lernumgebung für den Chemieunterricht hinsichtlich der vier Entwicklungsbereiche Förderschwerpunkt, Fachinhalt, Design und Usability.

6.4.1 Dimension Fachinhalt

Das chemische Fachwissen nimmt in dem Forschungsprojekt eine wichtige Rolle ein, sollte aber keine zusätzliche Herausforderung für die Bearbeitung der Lernumgebung darstellen. In der Rubrik *Konzept der chemischen Reaktionen* im Fachprofil Chemie für die neunte Klasse des Gymnasiums in Bayern (vgl. ISB, 2023c) ist das Donator-Akzeptor-Konzept bei Elektronenübergängen aufzufinden. Der zugehörige „Lernbereich 3“ des Chemielehrplans, der sich mit dem Entladen und Bilden von Ionen beschäftigt, listet für das Erreichen notwendiger fachbezogener Kompetenzen in dieser Jahrgangsstufe die Elektrolyse mit ihren Reduktions- und Oxidationsreaktionen auf (vgl. ISB, 2023c). Dabei bleiben naturwissenschaftlichen Denk- und Arbeitsweisen nicht unberücksichtigt. Die Lernumgebung sollte daher das reale, chemische Phänomen mittels AR-Hilfen erweitern bzw. erklären und das naturwissenschaftliche Arbeiten mit dem Realobjekt fördern (vgl. Klos et al., 2008). Dabei wird der reale Versuchsaufbau nicht durch die Technologie ersetzt (vgl. Bacca et al., 2014), sondern lediglich sinnvoll ergänzt (vgl. Goldkuhle, 1993). Angesichts dessen fiel die Wahl auf den Versuch *Elektrolyse von Zinkiodid*⁵ des Chemieanfangsunterrichts. Als weitgehend ungefährlicher chemischer Versuch eignet er sich als Schülerübung (vgl. ALP, 2014) und wird regelmäßig in den Chemiesälen der Realschulen sowie Gymnasien praktiziert. Die Versuchsobjekte sind weder zu groß noch zu klein oder zu komplex für den Einsatz im Fachunterricht und sollten aus fachlicher Perspektive eine didaktisch-reflektierte Aufbereitung mit AR-Repräsentationsformen erlauben (vgl. ISB, 2023b; Goldkuhle, 1993). Die Edukte und Reaktionsprodukte werden bei der Elektrolyse nicht nur vergleichend miteinander in Beziehung gebracht. Es lässt sich vielmehr die prozessuale Stoffumwandlung auch auf makroskopischer Ebene beobachten (vgl. Anton, 2002). Ferner sollte sich der Versuch für die Konzipierung einer AR-Lernumgebung besonders eignen, da es die Interaktion mit der virtuellen und realen Umgebung gewährleistet, aber nur wenig komplexe Eingriffe in die Versuchsanordnung erfordert. Redoxreaktionen laufen durch Anlegen einer externen Spannung freiwillig und schließlich ohne weitere Einflussnahmen ab (Riedel, 2010). Bei der realen Umgebung handelt es sich daher um ein Labor mit dem Versuchsaufbau der *Elektrolyse von Zinkiodid* im Macroscale (ALP, 2014). Nachdem die Zinkiodidlösung in das U-Rohr gefüllt wurde, steht die Beobachtung des Reaktionsablaufs unter Verwendung von AR im Fokus. Sobald ein Tablet mit der Applikation⁶ auf die Elektrolysezelle gerichtet wird, erscheint nach inhaltlicher und technischer Einführung im Vordergrund die virtuelle Lernumgebung (Chavan, 2016). Die AR-Inhalte können demnach exakt auf das Realobjekt projiziert werden und sollten somit die chemischen Prozesse auf submikroskopischer Ebene modellhaft erklären können (vgl. Huwer et al., 2019). Mit dem Funktionenmenü kann je nach Vorwissensstand interaktiv gelenkt werden, welche Optionen virtuell auf die reale Versuchsanordnung projiziert

⁵ eine Adaption auf andere chemische Themenbereiche ist ebenso möglich.

⁶ Die Applikation wurde mit Unity und Vuforia programmiert.

werden sollen (Schnitker, 2016; Schmalsteig & Höllerer, 2016). Das AR-Setting umfasst vier farblich voneinander abgegrenzte Lernpfade, die vor und nach Anschalten der Gleichspannungsquelle elaboriert werden: 1) *Versuchsaufbau*, 2) *Diffusion auf Teilchenebene*, 3) *Elektrolyse auf Teilchenebene* und 4) *Chemische Reaktionen*. Abbildung 18 visualisiert die Möglichkeiten der Funktionsauswahl in der AR-Lernumgebung.

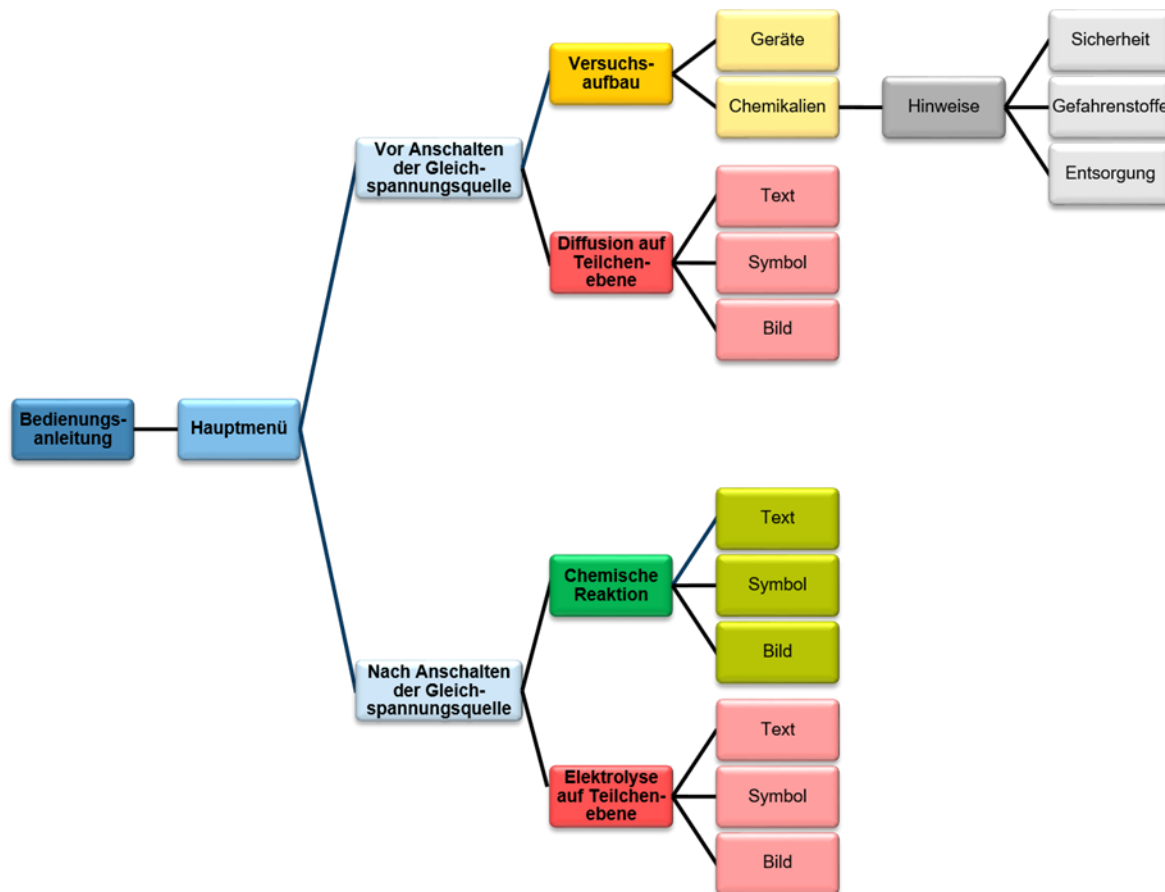


Abbildung 18. Übersicht der Funktionsauswahl in der AR-Lernumgebung mit ihren vier Lernpfaden und zugehörigen Auswahlmöglichkeiten vor und nach Anschalten der Gleichspannungsquelle.

Zu Beginn ist lediglich das Auswahlfeld (Button) *Vor Anschalten der Gleichspannungsquelle* aktiv. Hat sich der Proband durch den ersten Teil vollständig gearbeitet, wird der Button *Nach Anschalten der Gleichspannungsquelle* aktiviert. Der Lernpfad *Versuchsaufbau* fasst die Gerätschaften und Chemikalien zusammen. Ferner beinhaltet er Gefahrenstoff- und Sicherheitshinweise sowie Informationen zur Entsorgung. Bei Betrachtung des Lernpfads *Diffusion auf Teilchenebene* wird die Brownsche Molekularbewegung mit AR-Repräsentationen dargestellt. Im Lernpfad *Elektrolyse auf Teilchenebene*, welcher die Elektronenübergänge veranschaulicht, sollten durch die Einbindung des Lernpfads zur Diffusion auf Teilchenebene die Unterschiede in den Teilchenprozessen betont werden. In Bezug auf die physikalischen und chemi-

schen Prozesse sollte der Vergleich ungerichteter und gerichteter Bewegungen einen tiefergehenden Einblick in die submikroskopische Ebene ermöglichen und Modellierungsprozesse initiieren. Bewusst wurde auf die Begrifflichkeit „Brownsche Molekularbewegung“ verzichtet, um die Lehrkräfte einerseits nicht hinsichtlich ihrer fachlichen Kompetenzen zu überfordern und andererseits die ökologische Validität der Lernumgebung für den Unterricht an Realschulen sicherzustellen. Stattdessen wurde der Begriff „Diffusion“ gewählt. Auf diese Weise wurde den Probanden die Chance gegeben, ihr Fachwissen kundzutun, indem sie den bewusst implementierten Fehler („Falscher Fachbegriff“) korrigieren sollten. Die Konzeption zielte mit der Einbindung des Diffusionsbegriffs darauf ab, den Fokus nicht nur auf die Teilchenbewegungen nach Anschalten der Gleichspannungsquelle zu legen. Es sollten in gleichem Maße Gedankengänge der Probanden aktiviert werden, die sich auf die Teilchenbewegungen vor Reaktionsbeginn beziehen. Dabei wurden mit Blick auf das Vorwissen der Probanden Aussagen zur Berichtigung des Diffusionsbegriffs erwartet. Denkbar waren Erklärungen zur Brownschen Molekularbewegung oder zu Diffusionsprozessen bei der Herstellung der Zinkiodidlösung. Auch konnte es sich um Bezugnahmen zur allgemeingültigen Definition „Diffusion“ oder Anmerkungen zur Glaswolle als Membran für die Trennung des Kathoden- und Anodenraums handeln. Insgesamt bilden die beiden Lernpfade zu den Teilchenprozessen hinsichtlich des Stoff-Teilchen-Konzeptverständnisses den Kern der Lernumgebung. Im vierten Lernpfad zur chemischen Reaktion wird das Aufstellen der Teil- und Gesamtgleichungen zur Redoxreaktionen behandelt. Es wurden durchweg Informationen zu den einzelnen Inhalten der Lernpfade mittels unterschiedlicher Repräsentationen integriert.

6.4.2 Dimension Förderschwerpunkt

Werden die Rahmenbedingungen und Fachinhalte des AR-Settings aus Kapitel 6.4.1 zusammengeführt, so steht insbesondere der Stoff-Teilchen-Ebenenwechsel im Vordergrund. Demnach beschreibt der reale Versuchsaufbau die stoffliche Welt, welche mittels virtueller Objekte submikroskopisch, vor allem in den Lernpfaden zu den Teilchenprozessen, erklärt wird. Entsprechend soll das reale Phänomen Elektrolyse von Zinkiodid als Stoffebene identifiziert und die modellierten AR-Objekte in der Lernumgebung auf submikroskopischer sowie repräsentativer Ebene interpretiert werden. Dabei ist es notwendig, dass die Ebenen differenziert voneinander betrachtet werden und ineinander überführt werden können (vgl. Pfeifer et al., 2002; Reid, 2021; Taber, 2013). Ergänzende AR-Darstellungen liefern zusätzliche Informationen zu beiden Ebenen und leiten den Nutzenden durch die Lernumgebung. Das Tablet ermöglicht die Teilchenmodellierung und stellt zugleich eine Barriere zwischen den Ebenen dar, um eine mögliche und irreführende Vermischung dieser zu vermeiden (vgl. Kontinuumskonzept, vgl. Kapitel 2.1.2). Auf der einen Seite kann der Versuchsteilnehmende die reale Versuchsausrüstung durch das Tablet hindurch ohne weitere Informationen betrachten. Auf der anderen Seite wird durch aktive Nutzung des Tablets mit den enthaltenden AR-Objekten die Teilchenebene

demonstriert und didaktisch mit den realen Objekten bzw. Beobachtungen verknüpft (vgl. Kapitel 4.4). Dabei wird sowohl bei Betrachtung der Prozesse auf Teilchenebene als auch bei der Wahl der Reaktionsgleichungen, in Anlehnung an Kapitel 3.1, stets zwischen den Repräsentationsformen Textform, Symbolschreibweise und Bild unterschieden (s. Abbildung 18). Die verschiedenen (M)ER sollten auf einem angemessenen (hohen) fachsprachlichem Niveau das Phänomen der Redoxreaktion erläutern. Die AR-Lernumgebung ist so konzipiert, dass sie infolgedessen das Denken der Anwender in den drei Ebenen nach Johnstone (2000) erleichtern sollte. Diverse Repräsentationsformen können durch eine computergenerierte, sensorische Eingabe in die Realität, d.h. den realen Versuchsaufbau, eingeschleust werden (Chavan, 2016). Innerhalb eines Lernpfads wurden demnach inhaltlich präzise Repräsentationswechsel integriert. Beispielweise wurde das Phänomen der Reduktion im Lernpfad *Chemische Reaktionen* in Symbolschreibweise wie folgt dargestellt: *(am - Pol)* $Zn^{2+}_{(aq)} + 2 e^{-} \rightarrow Zn_{(s)}$. Die Paraphrasierung in Textform hingegen lautet: *(an der Kathode)* *Ein aquatisiertes, zweifach positiv-geladenes Zink-Ion (Kation) reagiert durch Aufnahme zweier Elektronen zu elementarem, festem Zink, d.h. einem Zink-Atom.* Dabei wurde erneut eine Schwachstelle in das Setting eingebaut, die die Lehrkräfte erkennen sollten. Der Repräsentationswechsel von Symbol in Text thematisierte die Verknüpfung von Stoff- und Teilchenebene. Die Symbole veranschaulichten einerseits die Teilchenebene (z.B. Zn^{2+}) und andererseits stellen sie mit der Bezeichnung des Aggregatzustands eine Verbindung zur Stoffebene her. Demnach ist bei der Paraphrasierung in Textform sehr viel Vorsicht geboten. Die Probanden sollten während der Arbeit mit der AR-Lernumgebung bemerken, dass der Text die beiden Ebenen ein Stück weit miteinander vermischt, denn elementares, festes Zink wird mit einem Zink-Atom nahezu gleichgesetzt. Aufgrund der Differenzierung zwischen der realen Beobachtung auf Stoffebene (Abscheidung von Zink) und der Erklärung auf Teilchenebene (Bildung eines Zn-Atoms) sollten die Probanden darauf aufmerksam werden und eine strikte Trennung der Ebenen vornehmen. Überdies wurden Abbildungen der Reaktionsgleichungen in den Lernpfad eingebaut. Dabei wurde kohärent auf einen exakten inhaltsgleichen Wechsel geachtet. Abbildung 19 zeigt die zweidimensionale Modelldarstellung der chemischen Reaktion am Beispiel der Reduktion. Sie schließt zum Zwecke der besseren Lernförderlichkeit Symboldarstellungen als MER ein und deutet die Beweglichkeit der Teilchen an.



Abbildung 19. Versuchsaufbau in der realen Umgebung mit Ausschnitt des Lernpfads Chemische Reaktion der AR-Lernumgebung (beta-Version); zu sehen ist ein U-Rohr mit zwei darauf befestigten Graphitelektroden, welches zu 2/3 mit einer farblosen Zinkiodidlösung befüllt wurde. Die Elektroden sind mit der Gleichspannungsquelle, die bereits angeschaltet war, verbunden. An der rechten Elektrode zeigt sich eine Gelbfärbung: Das Tablet liefert die bildliche Darstellung der Reduktion (nach Anschalten der Gleichspannungsquelle).

Während im Lernpfad *Chemische Reaktionen* die augmentierten Informationen neben dem U-Rohr eingeblendet werden können (vgl. Abbildung 19), mussten die Repräsentationsformen zur Veranschaulichung der Teilchenprozesse bei Symbol und Bild direkt mit dem realen Versuch verknüpft werden. Demzufolge war es von großer Bedeutsamkeit, auf die Dynamik der Teilchen zu achten. Charakteristisch für AR wurden die Teilchen derart animiert, dass sie sich stets im U-Rohr befinden und am Reaktionsfortschritt orientieren (Azuma, 1997; Schnitker, 2016). Die Prozesse auf Teilchenebene wurden zeitlich und räumlich mit der Versuchsdurchführung verbunden konzipiert (vgl. Split-Attention-Prinzip nach Ayres & Sweller, 2021 und Kohärenz- und Kontiguitätsprinzip nach Fiorella & Mayer, 2021, s. Abbildung 20). Vor Anlegen der Spannung befinden sich die beweglichen Kationen Zn^{2+} und Anionen I^- gleichverteilt in einem Verhältnis von 1:2 in Lösung. Während des Versuchsablaufs sind bereits aus vier Anionen I^- zwei Iod-Teilchen I_2 (s. in Abbildung 20 gelbe Schlieren an der Anode) und aus zwei Kationen Zn^{2+} zwei Zink-Teilchen Zn (s. in Abbildung 20 gräulicher Feststoff an der Kathode) entstanden (vgl. ALP, 2014):

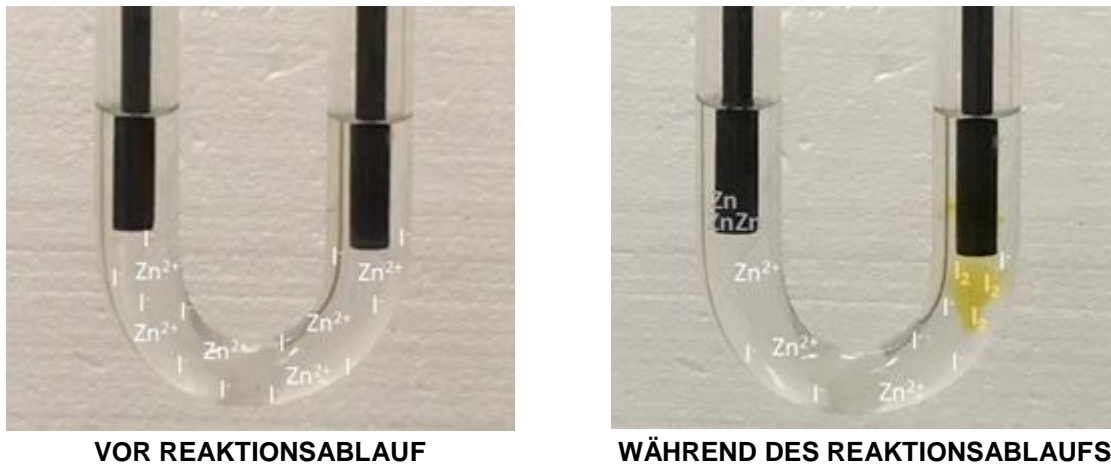


Abbildung 20. Sicht durch das Tablet auf den Versuchsaufbau in der realen Umgebung nach Anklicken der Lernpfade zu den Prozessen auf Teilchenebene (Symbol); links: Diffusion vor Reaktionsbeginn und rechts: Elektrolyse während des Versuchsablaufs (selbsterstellte Abbildung).

Im Vergleich dazu wurden die depiktionalen Abbildungen der Prozesse auf Teilchenebene nach Anklicken des Buttons *Bild* (Diffusion und Elektrolyse) dreidimensional dargestellt (vgl. Pfeifer et al., 2002). Um einer Verwechslung von Stoff- und Teilchenebene vorbeugen zu können, muss das Aussehen der Teilchen wohlbedacht gewählt werden (vgl. ISB, 2023b). Die Lernumgebung sollte den Nutzer dabei unterstützen, nicht voreilig von dem Erscheinungsbild der Teilchen auf die geometrische Beschaffenheit der Stoffe zu schließen, sondern den Modellcharakter zu erkennen. In der Modellvorstellung können Teilchen diverse Formen (z.B. Dreieck) annehmen. Atome und Ionen werden auf Basis ihrer Radiuslängen häufig in kugelförmiger Gestalt modelliert, was laut ISB (2023a,b) durchaus zulässig ist. Entsprechend wurde sich bei der Teilchenmodellierung der Atome und Ionen bewusst für die Kugelform entschieden. Dennoch wird angemerkt, dass sich die Atomradien auf die maximal möglichen Aufenthaltswahrscheinlichkeiten von Elektronen innerhalb von Orbitalen beziehen. Entsprechend ihrer Rechenmodelle müssen sie nicht ausschließlich kugelförmig sein und können hinsichtlich ihrer Form bei der Bearbeitung der AR-Lernumgebung kritisch von den Lehrkräften diskutiert werden. Ferner wurde neben der Beweglichkeit im Raum auch auf die Struktur der Teilchen geachtet. Jedoch war es zum Zeitpunkt der Pilotierung aufgrund technischer Unzulänglichkeiten (vgl. Tschiersch et al., 2021) noch nicht möglich, das Tablet zu drehen und verschiedene Perspektiven einzunehmen, obgleich die dreidimensionalen Animationen dies sicherstellen sollten. Im Rahmen der Vorstudie sollte vor allem dieser Gesichtspunkt mit Blick auf die Qualität der Lernumgebung untersucht und gegebenenfalls optimiert werden (vgl. finale AR-Lernumgebung in Kapitel 8.3). Überdies wurden unterschiedliche Teilchen (z.B. Anionen vs. Kationen) zur besseren Unterscheidbarkeit der chemischen Vorgänge voneinander abgegrenzt, indem verschiedene Farben gewählt wurden (vgl. Abbildung 20; Eitel & Scheiter, 2015). Iodmoleküle bzw. Zinkatome wurden im Vergleich zu den weiß-gefärbten Ionen gelb bzw. grau dargestellt (vgl. finale Lernumgebung in Kapitel 8.3).

Schließlich wurden in die AR-Lernumgebung Aufgaben implementiert, um die Probanden bei der Bearbeitung der Lernumgebung zu unterstützen und eine Förderung des Stoff-Teilchen-Konzeptverständnisses anzuregen (vgl. Kopp et al., 2003). Nach technischer Einführung in die Lernumgebung listet sie Instruktionen auf, die während der App-Bearbeitung beliebig beantwortet werden können. Dabei besteht zu jedem Zeitpunkt der Elaboration die Möglichkeit erneut zur Einführung in die Lernumgebung zu gelangen und die Aufgaben wiederholt einzusehen. Unter Zuhilfenahme der augmentierten Objekte und des Vorwissens sollten die Probanden zuerst den realen Versuchsaufbau der Elektrolyse von Zinkiodid und anschließend die Beobachtungen vor und während des Versuchsablaufs beschreiben. Ferner fordern die Instruktionen die Nennung der chemischen Reaktionen, die bei der Elektrolyse von Zinkiodid ablaufen. Neben Beschreibungen und Erklärungen zu den chemischen Prozessen auf Teilchenebene vor und während des Reaktionsablaufs, sollten die Probanden zudem einen Vergleich vor und nach Anlegen der Gleichspannungsquelle mit den virtuell eingeblendeten Teilchen in die Versuchsapparatur anstreben und die fachchemischen Hintergründe von Redoxreaktionen erklären.

6.4.3 Dimensionen Design

Das Setting stützt sich in Anlehnung an Kapitel 3.3 auf den wertvollen Erkenntnissen der Kognitionspsychologie (vgl. Fiorella & Mayer, 2021; Schnotz & Bannert, 2003). Im Sinne der Cognitive Load-Theorie sollte das Setting daher möglichst einfach und nur so detailreich wie nötig gestaltet werden, um einer überflüssigen kognitiven Belastung durch die Gestaltung der Lernumgebung entgegenzuwirken (vgl. *Extraneous Cognitive Load* nach Kalyuga & Sweller, 2014; Mayer, 2014b; Schnotz, 2001b). Demzufolge wurde die Lernumgebung mittels Lernpfade strukturiert (s.o. Kapitel 6.4.1). Eine vollständig freie Auswahl könnte zu unnötigen kognitiven Anstrengungen führen und bei „falscher“ Handhabung der Lernumgebung, im Sinne der Versuchsdurchführung, das Denken in den drei Ebenen nach Johnstone (2000) stören. Die Lernumgebung wurde nämlich so programmiert, dass nach Anklicken eines bestimmten Buttons gewisse Prozesse auf Teilchenebene ablaufen. Klickt der Lernende zu Beginn den Button „Elektrolyse auf Teilchenebene“ an, ohne aber die Gleichspannungsquelle eingeschaltet zu haben, stimmen Stoff- und Teilchenebene zeitlich nicht mehr überein. Nach dem Kontiguitätsprinzip (Fiorella & Mayer, 2021) stört dies sodann die kognitiven Modellierungsprozesse. Entsprechend sollte das Setting mithilfe dieser instruktionalen Maßnahme einer unnötigen extrinsischen Belastung entgegenwirken, sodass der Nutzer, in ausgewogenem Maße, durch die Lernumgebung geführt wird. Schließlich wurden die fachliche Klärung (Förderschwerpunkt, Kapitel 6.3.2) und die Perspektiven der Lernenden (vgl. Schwierigkeiten mit dem Stoff-Teilchen-Konzept und der chemischen Fachsprache, Kapitel 2 und 3; Kapici, 2023; Vosniadou, 1994) gleichwertig in den konzeptuellen Entwicklungsprozess der Lernumgebung ein-

gebunden. Unter Zuhilfenahme von AR sollte so eine neue Möglichkeit der didaktischen Strukturierung (vgl. Reinfried et al., 2009) hinsichtlich des Stoff-Teilchen-Ebenenwechsels erzielt werden. Auf Basis des Modells zum multimedialen Lernen nach Mayer (2002) wurden die Art, Anzahl, Anordnung und Verknüpfung der Repräsentationsformen in der Lernumgebung gründlich eruiert. Die größte Besonderheit weist die AR-Lernumgebung in Bezug auf die Kopplung der AR-Objekte mit dem Ablauf in der realen Versuchsanordnung auf. Während klassische Simulationen oder Animationen (vgl. Schnitker, 2016) die virtuellen Teilchenprozesse von den realen Beobachtungen auf Stoffebene trennen, können diese mittels AR vereint werden. Mit dem Ziel positive Lerneffekte durch den Umgang mit chemischen Repräsentationsformen auf Stoff- und Teilchenebene zu erzielen, wurden die (M)ER als AR-Objekte, ohne Split-Attention (Ayres & Sweller, 2021), in das Setting integriert (vgl. Schnitker, 2016). Dem Kohärenz- und Kontiguitätsprinzip von Mayer und Fiorella (2021) folgend wurden die virtuellen, submikroskopischen Modelle mit dem realen, beobachtbaren chemischen Versuchsaufbau unter Berücksichtigung der Reaktionsdynamik räumlich und zeitlich verknüpft, sodass die Informationen semantisch im Zusammenhang stehend dargeboten sind (vgl. Chavan, 2016; Schmalstieg & Höllerer, 2016). Aus kognitionspsychologischer Sicht ist es sehr effizient, interaktive Visualisierungen für den Wissenserwerb zu nutzen (Farida, 2009; Schnotz & Bannert, 2003; Mayer, 2014; Schnitker, 2016; Herga et al., 2016; Peperkorn & Schwedler, 2021). Indem Auswahloptionen für die Verwendung der digitalen Objekte, z.B. drei Buttons für *Symbole*, *Bilder* oder *Texte*, gegeben werden, können die Lernenden ihren Lernprozess selbst steuern (vgl. Schnitker, 2016; Schnotz & Bannert, 2003) und Translationen zwischen den Repräsentationsformen eigenständig initiieren (Ainsworth, 1999; Kozma & Russell, 2005). In Anlehnung an das Multiple-Representation-Principle von Mayer (2021) bietet die AR-Lernumgebung daher stets die Möglichkeit, gezielt alle, oder eine ausgewählte Menge an Informationen eines Lernpfads, ein- und auszublenden (Bsp.: gleichzeitiges Öffnen von bildlichen Informationen zur Reduktion, Oxidation und Gesamt-Redoxreaktion). Die Signalbedeutungen und semantischen Vernetzungen sollten sodann mithilfe von AR selbst entwickelt werden (vgl. Leisen et al., 2009; Schnotz, 2005). Schließlich kann sich der Nutzende bewusst gegen oder für das Einblenden einer AR-Information entscheiden und diese, abhängig von seinen bestehenden kognitiven Schemata des Langzeitgedächtnisses, mental verknüpfen (Steinbuch, 1977; Schnotz & Bannert, 2003). Entsprechend sollte durch die AR-Lernumgebung ein Denken in Modellen eingeleitet werden (vgl. Johnstone, 2000; Justi & Gilbert, 2002). Dabei wurde bezogen auf den Informationsgehalt der Lernpfade Redundanz vermieden (vgl. Redundanzprinzip nach Kalyuga & Sweller, 2014), sodass Texte, Bilder und Symbole in einem ausgewogenen Maße eingesetzt wurden. Ferner wurden mit dem Ziel die Inhalte der AR-Lernumgebung auf die Bedarfe der Lernenden anzupassen und perspektivisch Anwendung im Chemieunterricht zu finden, komplexe chemische Inhalte teilweise reduziert und vereinfacht (vgl. Talanquer, 2011; van Driel & Verloop, 1999;

Barke, 2006; Pfeifer et al., 2002; Grüner, 1967; Kabaum & Anders, 2020). Zwar wurde in der Teilchenmodellierung auf die Größenverhältnisse der Ionen, Atom- und Molekülradien geachtet, jedoch wurde eine übersichtliche Menge an Ionen gewählt, obgleich in der Realität viel mehr Teilchen vorliegen. Eine kognitive Überanstrengung (vgl. Sweller, 2011) soll somit vermieden werden. Schließlich war es hinsichtlich der adäquaten Fachsprache wichtig die Aggregatzustände in deskriptionalen Repräsentationen zu nennen (vgl. Barke, 2006). Ein Weglassen dieser Angaben bei der Darstellung von Reaktionen wäre folglich fachsprachlich nur bedingt korrekt. In Bildern wurde jedoch auf diese Information verzichtet. Es wurden weder die Wassermoleküle selbst noch die Wasserstoff- bzw. Sauerstoff-Anlagerungen an den Ionen visualisiert. Im Falle einer uneingeschränkten Integration der Solvatisierung müssten die Hydrathüllen zusätzlich bei den Prozessen auf Teilchenebene (Diffusion und Elektrolyse) sichtbar gemacht werden. Mit Blick durch das Tablet würden die Teilchen jedoch zu gedrängt wirken. Getreu dem Kohärenzprinzip nach Mayer und Fiorella (2021), ist es ratsam, die Menge an Repräsentationen sinnvoll zu wählen und übersichtlich einzusetzen. Insofern sollte durch den Verzicht der Dissoziation die Stofffülle in der Lernumgebung auf ein erträgliches Maß an Informationen minimiert und an das Vorwissen der Zielgruppe angepasst werden (vgl. Grüner, 1967).

Schließlich kann der Lernende in dem realen Versuchsaufbau die Vorgänge auf Stoffebene beobachten. Gleichzeitig macht die AR-Lernumgebung die Prozesse und Reaktionen auf Teilchenebene im Modell sichtbar. AR sollte damit die kognitive Informationsverarbeitung und das selbstregulierte Steuern der Lernprozesse bei realer Versuchsbeobachtung in besonderem Maße unterstützen (vgl. Augmentation und Modifikation, SAMR-Modell nach Romrell et al., 2014). Durch die besonderen technischen Funktionalitäten der AR-Lernumgebung wie der Einbindung der verschiedenen AR-Repräsentationsformen vor dem Hintergrund der Stoff- und Teilchenebene, sollte ein Lernen in den drei Ebenen (vgl. Kapitel 2.1; Johnstone, 2000) ermöglicht werden.

6.4.4 Dimensionen Usability

Obgleich in jüngsten Untersuchungen (vgl. Huwer, 2019) AR-Lernumgebungen im Fach Chemie für gestufte Hilfen mittels „einfacher“ Softwareprogramme erstellt wurden (Bsp. „HP Reveal“, vgl. auch Huwer et al., 2019), handelt es sich bei dem hier vorgestellten Lernsetting um eine komplexere Anwendung von AR. Kontrastfreie Geräte und Chemikalien, wie in der Chemie üblich (z.B. das U-Rohr mit farbloser Zinkiodidlösung), können nur sehr schwer detektiert werden (Tschiersch et al., 2021). Um eine lernwirksame AR-Umgebung zu gestalten, müssen mehrere Sensoren, die die Positionen und Orientierungen der realen Gerätschaften erfassen, am Versuchsaufbau angebracht werden (Maier, 2014). Angesichts des dynamischen Aspekts beim Versuchsablauf und den damit verbundenen Veränderungen der Umgebung bei Interaktion mit den virtuellen Teilchen gingen zusätzliche Programmierschwierigkeiten einher (Maier,

2014; Schmalstieg & Höllerer, 2016). Die virtuellen Teilchen mussten zeitlich exakt in den Versuchsablauf eingebunden werden, um das Kohärenz- und Kontiguitätsprinzip nach Mayer und Fiorella (2021) nicht zu verletzen (s. Kapitel 3.3; Schmalstieg & Höllerer, 2016; Mayer, 2014; Schnotz & Bannert, 2003). Für die Nutzung der AR-Lernumgebung wurde ein Endgerät mit Touchpad (Tablet) gewählt, welches in den letzten Jahren durch die häufige Anwendung im Alltag und Beruf als „gängig“ angesehen werden kann und damit besonders kompatibel erscheint (vgl. Fischer et al., 2015; Nerdel & Kotzebue, 2020). Zum Zeitpunkt der Pilotierung konnten zwar die (dynamischen) Repräsentationsformen in das Setting implementiert werden, der Entwicklungsstand war jedoch noch nicht so weit vorangeschritten, dass das Tablet während der App-Testung umpositioniert werden konnte. Auch wenn diese beta-Version technische Einschränkungen aufwies, sollte sie insbesondere in den drei vorher beschriebenen Dimensionen eine Prüfung der aktuellen Systemqualität als Voraussetzung für die Weiterentwicklung gestatten. Dabei lehnte sich die technische und konzeptionelle Umsetzung neben den in Kapitel 3.3 angeführten Gestaltungskriterien an den Grundsätzen der EN ISO 9241-110 (Europäisches Komitee für Normung, 2020; Figl, 2010) und den Gestaltungskriterien von Kopp et al. (2003) an. Nachstehend wird die konzeptionelle und inhaltliche Aufbereitung vor dem Hintergrund der Usability-Merkmale beleuchtet (vgl. Kapitel 4.4.2):

Die in Abbildung 19 dargestellte Übersicht der Lernpfade und Inhalte (vgl. Kapitel 6.4.1) wurde als „Funktionenbaum“ zur Navigation in das Setting implementiert. Damit sollten sich die Versuchspersonen durch die Lernumgebung navigieren und gleichzeitig einen Anhaltspunkt haben, der aufzeigt, in welchem Lernpfad sie sich befinden bzw. welche noch bearbeitet werden müssen. Im Sinne der Aufgabenangemessenheit sollte der Funktionenbaum eine einfache Bedienung mit effizienter und effektiver Aufgabenbearbeitung erlauben. Die Aufgaben wurden, mit der Option auf erneute Einsichtnahme, kompakt und verständlich in der Einführung formuliert, um die Ziele bei der Bearbeitung der Lernumgebung transparent zu machen. Indem keine weiteren instruktionalen Vorgaben gemacht wurden, sollten die Probanden ihren Elaborationsprozess selbst regulieren können. Ferner wird der Grundsatz der Steuerbarkeit durch die adaptiven Auswahlmöglichkeiten der Lernpfade mit zugehörigen Repräsentationsformen (Text, Symbol, Bild) unterstrichen (vgl. Bannert, 2009). Es wurde dementsprechend darauf geachtet, dass die Versuchspersonen so weit wie möglich selbst entscheiden können, welche Lernpfade und darin enthaltenen Informationen (z.B. 1. Reduktion und 2. Oxidation oder vice versa) auf das Realobjekt projiziert werden sollen. Angesichts der Kriterien zur instruktionalen Unterstützung und Selbstbeschreibungsfähigkeit, wurden in der Einführung technische Hinweise sowie Informationen zu den Beschriftungen gegeben. So wird der Proband mit den Funktionen der Lernumgebung vertraut gemacht und kann diese weitgehend intuitiv bedienen. Hierfür wurden unter anderem klassische Symbole wie ein Pfeil auf dem „weiter“-Button oder ein Haus auf dem Home-Button in das Setting implementiert. Mit Blick auf die fachinhaltliche

Aufbereitung wurden für die Unterrichtsmaterialkonzeptionierung erwartungsgemäß die bekannten Aspekte der Elektrolyse mit essenziellen Inhalten zur Reduktion, Oxidation und Redox-Gesamtreaktion sowie ihren gängigen Teilchenmodellierungen (z.B. Elektronenbewegung) in die Lernumgebung eingebaut. Dies sollte, bezogen auf die grundsätzlichen Vorerfahrungen mit technischen Softwaresystemen sowie der Fachthematik, ein hohes Maß an Erwartungskonformität sicherstellen. Dabei stützen sich alle Lernpfade auf demselben Design. In der technischen und inhaltlichen Einführung vor Bearbeitungsbeginn wird die Lehrkraft darauf hingewiesen, die Gleichspannungsquelle erst dann einzuschalten, wenn die ersten beiden Lernpfade elaboriert wurden. Sofern die Inhalte zu Beginn gewissenhaft gelesen wurden, wurde diese mögliche Fehlerquelle umgangen. Demnach schien auch der Grundsatz der Fehlertoleranz erfüllt worden zu sein, der eine möglichst reibungslose Auseinandersetzung mit dem Softwareprogramm ohne technischer Komplikationen zu erreichen versucht. Ferner werden bei der Elaboration der Lernumgebung keine weiteren Eingaben oder Eingriffe erwartet, die zu Schwierigkeiten führen könnten. Zudem stand die Versuchsleitung bei Problemen, die während der App-Testung auftraten, jederzeit zur Verfügung. Zur besseren Verständlichkeit und Wirkung der Medien wurden die (M)ER inhaltlich aufeinander bezogen, sachzusammenhängend angeordnet und anschaulich, konzentriert auf die Elektrolyse von Zinkiodid repräsentiert (vgl. Fiorella & Mayer, 2021). Ferner lässt sich die authentische Gestaltung der Teilchenprozesse an dem gängigen Schülerversuch „Elektrolyse von Zinkiodid“ dem Gestaltungskriterium Problemorientierte Didaktik unterordnen (vgl. Bürg, 2005). Dementsprechend fußt die mediale und (medien-) didaktische Gestaltung in Hinblick auf die Usability (vgl. Kopp et al., 2003; Bürg, 2005) maßgeblich auf den fachdidaktischen Aspekten aus Kapitel 2 und den kognitionspsychologischen Modellen aus Kapitel 3.3. Die Inhalte (Texte, Symbole und Bilder) der Info-Boxen bzw. AR-Objekte wurden fachdidaktisch derart aufbereitet, dass sie aufgrund der umgesetzten Gestaltungskriterien (s.o. Kapitel 6.3.4) lernwirksam sind. Ferner sollten sie inhaltlich und technisch unterstützend wirken, um eine hohe Lernförderlichkeit zu erreichen. Mit Blick auf die inhaltliche Konzeptionierung der AR-Lernumgebung müsste demnach ein perspektivischer Einsatz im Fachunterricht realistisch umsetzbar sein.

6.5 Statistische Analysemethoden

6.5.1 Deskriptive Analyse

Zur Erfassung der Einstellungen und Selbstwirksamkeitserwartungen sowie der Akzeptanz und Usability der AR-Lernumgebung wird eine deskriptive Analyse in SPSS durchgeführt. Mit ihr können Aussagen über das Minimum und Maximum (den kleinsten und größten Wert) sowie den Mittelwert (M) und die Standardabweichung (SD) getroffen werden (vgl. Bortz & Schuster, 2010; Kuckartz et al., 2013).

6.5.2 Itemanalyse

Im Rahmen der Itemanalyse wurden die Messgrößen zur Verbesserung der Testgüte hinsichtlich Schwierigkeitsindex und Trennschärfe untersucht (vgl. Bortz & Döring, 2016; Moosbrugger & Kelava, 2012). Hierfür erfolgte eine Umkodierung der Ratingskalen, sodass diese bei null beginnen und bis drei reichen. Es folgte anschließend die statistische und inhaltliche Itemselektion, welche sowohl Umformulierungen als auch Eliminierungen umfasste (Moosbrugger & Kelava, 2012; Osterlind, 1998).

Der Itemschwierigkeitsindex gibt den prozentualen Anteil P_i der richtigen Beantwortungen des Items i in einer Stichprobe an und ist bei schwierigen Items niedrig bzw. bei leichten hoch (vgl. Lienert & Raatz, 1998)

$$P_i = \frac{\bar{x}_i}{\max(x_i)} \cdot 100$$

P_i eines Items i kann demnach durch den Quotienten aus dem Mittelwert \bar{x}_i dieses Items und der maximal erreichbaren Punktschritte $\max(x_i)$, multipliziert mit 100, beschrieben werden (Moosbrugger, 2012). Dabei sollte der Wertebereich der Itemantworten auf dem Item i bei 0 beginnen. Liegen die Itemschwierigkeiten im mittleren Bereich mit $20\% < P_i < 80\%$ so können diese akzeptiert werden (Bortz & Döring, 2002). Obgleich ein mittlerer Wert von 50 % erstrebenswert scheint, wird eine breite Streuung der Itemschwierigkeiten bevorzugt.

Die Trennschärfe gibt die Korrelation eines Items mit dem Gesamtmittelwert aller Items an (vgl. Bortz & Döring, 2006; Lienert & Raatz, 1998). Als Maß für den Zusammenhang kann die Trennschärfe Werte zwischen -1 und 1 annehmen. Korreliert ein Item nur wenig mit der Summe der restlichen Items, repräsentiert dieses Item nur schlecht den Gesamttest. Die Folge sollte dann eine Eliminierung des Items sein. Anzustreben ist demnach eine hohe Trennschärfe, um eine exakte Unterscheidbarkeit der Items zu erhalten (Bortz & Döring, 2016). Korrelieren die Items hoch miteinander, so kann eine hohe interne Konsistenz abgeleitet werden (vgl. Moosbrugger & Kelava, 2012). Dabei sollte die Korrelation eines jeden einzelnen Items mit dem zugehörigen Subkonstrukt Werte größer gleich $.30$ erlangen, um in die Skala aufgenommen zu werden. Eine Item-Total-Korrelation ab $.50$ ist als hoch einzustufen und wird angestrebt (Kuckatz et al., 2013). In diesem Zusammenhang können die Item-Korrelationen für die Entwicklung von Haupt- und Subskalen zur Ermittlung verschiedener Konstrukte genutzt werden.

6.5.3 Reliabilitätsanalyse

Auf Basis der Itemanalyse schlossen sich die finalen Skalenbildungen mit zugehöriger Reliabilitätsanalysen an. Zur Ermittlung der inneren Konsistenz der Skalen wird als geeigneter Reliabilitätskoeffizient Cronbachs α herangezogen (vgl. Bühl, 2019; Moosbrugger & Kelava,

2012) und zur Analyse der Skalenreliabilität genutzt (Bortz & Döring, 2016). Das Wertespektrum des Koeffizienten ist per se vergleichbar mit dem eines Korrelationskoeffizienten von -1 bis 1. Jedoch gilt folgende Interpretation zu beachten: Skalen mit α -Werten zwischen .70 und .80 können als brauchbar angesehen werden. Werte, die über .80 liegen sind als gut einzustufen. Von sehr guten Werten spricht man bei $\alpha > .90$ (Bortz & Döring, 2016; Kuckartz et al., 2013). Da die Erfassung der Skalenreliabilität mittels Cronbachs alpha bei Skalen mit nur zwei Items (vgl. Skala *Selbstwirksamkeit (dig) TK* aus Hauptstudie 1 in Kapitel 9.1.1) sehr umstritten ist (vgl. Eisinga et al., 2013), wird in der vorliegenden Arbeit für diesen Fall auf die Spearman-Brown-Formel zur Schätzung der Zuverlässigkeit einer Gesamtskala zurückgegriffen. Dabei werden für jede Testperson zwei Testwerte ermittelt, die sich jeweils auf die Hälfte der Items beziehen. Es handelt sich gewissermaßen um einen „Paralleltest“ mit halber Länge (vgl. Bortz & Döring, 2016). Die Testhalbierungs-Reliabilität kann dabei als Korrelation der Testwerte der Testhälften angesehen werden. Da jedoch die Testhalbierungs-Methode die Reliabilität des Gesamttests unterschätzt, kann die Spearman-Brown-Formel den Reliabilitätskoeffizienten der Testhalbierung nachträglich um den Wert, der durch die Testhalbierung verloren ging, aufwerten.

Die Auswahl der Items stützt sich auf dem Einsatzzweck des Messinstrumentes und muss diesem gerecht werden (Moosbrugger & Kelava, 2012). Neben den deskriptivstatistischen Kennwerten müssen auch fachdidaktische Überlegungen in den Selektionsprozess eingebunden werden. Diese können gegebenenfalls den Einsatz eines zu leichten oder schweren Items mit einer gegebenenfalls zu niedrigen Trennschärfe rechtfertigen (vgl. Moosbrugger & Kelava, 2012). Sollen beispielsweise Items mit Schwierigkeitsindex in den Bereichen $5\% \leq P_i \leq 20\%$ oder $80\% \leq P_i \leq 95\%$ in den Test eingebunden werden, so sollten sie wenigstens ausreichend hohe Trennschärfen besitzen (vgl. Moosbrugger & Kelava, 2012).

7 Ergebnisse Vorstudie

7.1 Skalendokumentation der finalen Erhebungsinstrumente zur Erfassung der Personenmerkmale sowie Akzeptanz und Usability

Nach Umpolung und Rekodierung weniger negativ formulierter Items wurden die Skalengüten mit Item- und Reliabilitätsanalysen überprüft. Im Zuge der Itemanalyse wurden zuerst die Itemschwierigkeiten identifiziert. Im nächsten Schritt erfolgte die Begutachtung der Trennschärfen. Mit Blick auf die Forschungsfrage FF_{Pilot} (vgl. Kapitel 5.1) steht der Umgang mit (M)ER auf Stoff- und Teilchenebene im Zentrum dieser Arbeit. Wenige Items (z.B. E11_dig mit $P_{E11_dig} = 85\%$) wurden trotz eines Schwierigkeitsindex $> 80\%$ in der jeweiligen Skala beibehalten, da sie aufgrund ihres Inhalts zur Erfassung der Merkmale des Individuums bzw. der Lernumgebung notwendig waren. In diesem Fall erfolgte eine Umformulierung der Items, sodass ihr Schwierigkeitsgrad angehoben wurde (vgl. Fragebogen im Anhang). Gleiches gilt für die Trennschärfe. Obwohl wenige Items (z.B. E7_dig) eine niedrige Trennschärfe mit $< 30\%$ besaßen, wurden sie nicht aus der jeweiligen Skala ausgeschlossen. Dies kann dadurch begründet werden, dass sie evidenzbasiert entwickelt wurden, um wichtige Aspekte des TP(C)Ks und des Stoff-Teilchen-Konzepts zu erfassen. Überdies störten sie die Skalenreliabilität nicht, da sie mit $\alpha > .80$ eine gute innere Konsistenz aufzeigten (vgl. Kuckartz et al., 2013). Ferner wurden wegen der insgesamt hohen Itemanzahlen in beiden Fragebögen Items zum Modellverständnis eliminiert. Im Anhang findet sich eine ausführliche Auslistung aller Itemschwierigkeiten und Trennschärfen.

7.1.1 Personenmerkmale

Der resultierende Fragebogen zu den Merkmalen des Individuums enthält vier Skalen, die sich in den Dimensionen *Digitale Medien* und *AR* unterscheiden und weitgehend mit dem ursprünglichen Fragebogen übereinstimmen. Nachstehend wird jede Skala mit ihren Items, die in der Vorstudie zur Erfassung der Personenmerkmale eingesetzt wurden, vorgestellt.

Einstellungen hinsichtlich digitaler Medien. Von den insgesamt 24 Items zu den Einstellungen hinsichtlich digitaler Medien zeigten fünf Items Werte etwas über dem mittleren Itemschwierigkeitsbereich, der zwischen 20 % und 80 % (vgl. Kapitel 6.5.2) lag (vgl. Anhang). Demzufolge wurden die zu leichten Items E1_dig, E19_dig, E21_dig und E23_dig aus der Skala eliminiert. Die Trennschärfen lagen durchschnittlich bei $\geq .30$ und größtenteils $\geq .50$. Auffälligkeiten wurden bei fünf Items aufgedeckt, da sie Trennschärfen unter $.30$ aufzeigten (vgl. Tabelle 13). Schrittweise erfolgte eine Itemreduktion der Items E21_dig und anschließend E20_dig, um die Reliabilität der Skala zu erhöhen. Die sukzessive Eliminierung der beiden Items sorgte bei den Items E2_dig bis E6_dig für positive Verschiebungen der Trennschärfen und optimierte die innere Konsistenz der Skala auf $\alpha = .92$. Nach Blanz (2015) weist die Skala damit einen exzellenten Wert der internen Konsistenz ($\alpha > .80$) auf (vgl. Naumann et al., 2001;

s. Tabellen 13 und 14). Mit $M = 2.03$ ($SD = 0.44$) scheinen die Befragten eine tendenziell positive Einstellung hinsichtlich digitaler Medien zu haben.

Tabelle 13. Übersicht der Items aus der Skala Einstellungen hinsichtlich digitaler Medien unter Angabe der Probandenanzahl (N), des Mittelwerts (M), der Standardabweichung (SD), der Trennschärfe (r_{it}) und der Reliabilität (α).

Einstellungen					
<i>Skala: Einstellungen hinsichtlich digitaler Medien (Skalenkürzel: E_dig; Itemanzahl: 18)</i>					
<i>N = 20; M = 2.03; SD = 0.59; $\alpha = .88$</i>					
Nr.	Item	M	SD	r_{it}	α
1	E_dig_2	2.20	0.41	.37	.87
2	E_dig_3	1.85	0.75	.76	.86
3	E_dig_4	2.20	0.70	.49	.87
4	E_dig_5	1.45	0.83	.52	.87
5	E_dig_6	1.75	0.79	.63	.86
6	E_dig_7	1.90	0.72	.14	.88
7	E_dig_8	2.15	0.81	.27	.88
8	E_dig_9	2.15	0.88	.68	.86
9	E_dig_10	1.60	0.94	.59	.87
10	E_dig_11	2.55	0.76	.52	.87
11	E_dig_12	2.00	0.86	.63	.86
12	E_dig_14	2.10	0.45	.16	.88
13	E_dig_15	2.00	0.56	.53	.87
14	E_dig_16	2.20	0.62	.57	.87
15	E_dig_17	1.55	0.94	.54	.87
16	E_dig_18	2.30	0.66	.55	.87
17	E_dig_22	2.15	0.99	.63	.86
18	E_dig_24	2.35	0.88	.36	.88

Einstellungen hinsichtlich AR. Bezogen auf die Itemschwierigkeiten der Skala Einstellungen hinsichtlich AR ergab die Itemanalyse einen durchschnittlichen Schwierigkeitsgrad der Probandenantworten von ca. 61 %. Dies kann als mittlere Itemschwierigkeit angesehen werden. Die nähere Betrachtung der Items zeigte lediglich drei Items, die sich mit Werten knapp ≥ 80 % über dem festgelegten Itemschwierigkeitsbereich befanden. Da es sich um Werte handelt, die den oberen Grenzwert von 80 % exakt erreichen (z.B. Item E20_aug) oder nur minimal übersteigen, war ein Itemausschluss nicht zwingend notwendig. Hinsichtlich der Trennschärfe wurde festgestellt, dass die Skala zu den Einstellungen hinsichtlich AR mit ihren 21 Items eine sehr gute Reliabilität mit $\alpha = .92$ besitzt (vgl. Kuckartz et al., 2013). Die Ermittlung der Trennschärfen lieferte eine besondere Auffälligkeit bei Item E19_aug (vgl. Tabelle 14). Mit einer Trennschärfe $< .10$ korreliert das Item kaum mit der Skala, sodass dies eine Eliminierung nach sich zog. Der Itemausschluss führte insgesamt zu Verschiebungen (sowohl Erhöhungen als auch Erniedrigungen) der einzelnen Trennschärfen und erhöhte die innere Konsistenz des Konstrukts auf $\alpha = .92$ an (vgl. Tabelle 14). Die deskriptive Analyse zeigte, dass der Einsatz

von AR im Chemieunterricht relativ vielversprechend angesehen wird. Der Mittelwert der Skala *Einstellungen zu AR* lag mit $M = 1.84$ ($SD = 0.47$) leicht über dem mittleren Bereich.

Tabelle 14. Übersicht der Items aus der Skala *Einstellungen hinsichtlich AR* unter Angabe der Probandenanzahl (N), des Mittelwerts (M), der Standardabweichung (SD), der Trennschärfe (r_{it}) und der Reliabilität (α).

<i>Einstellungen</i>					
<i>Skala: Einstellungen hinsichtlich AR (Skalenkürzel: E_aug; Itemanzahl: 20)</i>					
<i>N = 20; M = 1.84; SD = 0.59; $\alpha = .92$</i>					
Nr.	Item	M	SD	r_{it}	α
1	E_aug_1	1.40	0.75	.38	.91
2	E_aug_2	1.65	0.81	.38	.91
3	E_aug_3	1.90	0.72	.77	.91
4	E_aug_4	2.00	0.79	.59	.91
5	E_aug_5	0.90	0.72	.68	.91
6	E_aug_6	1.75	0.72	.90	.90
7	E_aug_7	1.70	0.92	.41	.92
8	E_aug_8	2.15	0.67	.27	.92
9	E_aug_9	2.00	0.79	.80	.90
10	E_aug_10	1.45	1.00	.57	.91
11	E_aug_11	2.25	0.85	.61	.91
12	E_aug_12	1.90	0.79	.65	.91
13	E_aug_14	1.55	0.51	.33	.91
14	E_aug_15	1.35	0.59	.44	.91
15	E_aug_16	1.75	0.72	.66	.91
16	E_aug_17	1.85	0.81	.37	.92
17	E_aug_18	1.95	0.89	.76	.91
18	E_aug_20	2.40	0.60	.65	.91
19	E_aug_21	2.45	0.83	.67	.91
20	E_aug_22	2.40	0.68	.48	.91

Selbstwirksamkeitserwartungen hinsichtlich digitaler Medien. Die Itemanalysen der Skala *Selbstwirksamkeit hinsichtlich digitaler Medien* lieferte einen durchschnittlichen Schwierigkeitsgrad von ca. 60 % (vgl. Tabelle 15). Mit einem Cronbachs alpha von .93 demonstrierte die Skala eine sehr gute innere Konsistenz. Außer Item SW16_dig lagen die Trennschärfen aller Items deutlich über .30 und vermehrt über .50 (vgl. Anhang). Der genannte Ausreißer wies eine Trennschärfe von .28 auf und konnte gerade noch akzeptiert werden (vgl. Kuckartz et al., 2013). Im Vergleich zu den Einstellungen wurden die Selbstwirksamkeitserwartungen heterogener, mit höheren Standardabweichungen, beurteilt. Die Versuchspersonen schätzten ihre eigene Expertise zum Umgang mit digitalen Medien überwiegend gut ein, bei einem insgesamt leicht über dem Mittelwert liegenden Skalenniveau ($M = 1.82$, $SD = 0.63$).

Tabelle 15. Übersicht der Items aus der Skala Selbstwirksamkeit hinsichtlich digitaler Medien unter Angabe der Probandenanzahl (N), des Mittelwerts (M), der Standardabweichung (SD), der Trennschärfe (r_{it}) und der Reliabilität (α).

Selbstwirksamkeit					
<i>Skala: Selbstwirksamkeit hinsichtlich digitaler Medien (Skalenkürzel: SW_dig; Itemanzahl: 15)</i>					
<i>N = 20; M = 1.82; SD = 0.77; α = .93</i>					
Nr.	Item	M	SD	r_{it}	α
1	SW_dig_1	1.90	0.97	.80	.92
2	SW_dig_2	2.15	0.81	.43	.93
3	SW_dig_3	1.95	0.83	.82	.92
4	SW_dig_4	1.65	1.04	.80	.92
5	SW_dig_5	2.10	0.72	.77	.92
6	SW_dig_6	1.75	0.72	.83	.92
7	SW_dig_7	1.45	0.94	.68	.93
8	SW_dig_8	1.65	0.93	.57	.93
9	SW_dig_9	1.95	0.83	.60	.93
10	SW_dig_10	1.65	0.75	.76	.92
11	SW_dig_11	1.70	0.98	.76	.92
12	SW_dig_12	1.70	0.92	.78	.92
13	SW_dig_13	1.30	0.86	.88	.92
14	SW_dig_15	2.15	0.93	.32	.94
15	SW_dig_16	2.25	0.85	.28	.94

Selbstwirksamkeitserwartungen hinsichtlich AR. Die Itemanalysen der Skala Selbstwirksamkeit hinsichtlich AR lieferte hinsichtlich der Itemschwierigkeit einen Durchschnittswert von ca. 41 % (vgl. Tabelle 16).

Tabelle 16. Übersicht der Items aus der Skala Selbstwirksamkeit hinsichtlich AR unter Angabe der Probandenanzahl (N), des Mittelwerts (M), der Standardabweichung (SD), der Trennschärfe (r_{it}) und der Reliabilität (α).

Selbstwirksamkeit					
<i>Skala: Selbstwirksamkeit hinsichtlich AR (Skalenkürzel: SW_aug; Itemanzahl: 13)</i>					
<i>(N = 20; M = 1.16; SD = 0.94; α = .96)</i>					
Nr.	Item	M	SD	r_{it}	α
1	SW_aug_2	1.00	0.97	.84	.95
2	SW_aug_3	1.60	1.05	.50	.96
3	SW_aug_4	0.85	0.93	.77	.95
4	SW_aug_5	0.90	0.91	.83	.95
5	SW_aug_6	1.35	1.14	.84	.95
6	SW_aug_7	1.05	1.00	.85	.95
7	SW_aug_8	1.00	0.92	.70	.95
8	SW_aug_9	1.25	0.91	.66	.96
9	SW_aug_10	1.45	1.05	.73	.95
10	SW_aug_11	1.30	0.92	.81	.95
11	SW_aug_12	1.05	0.89	.81	.95
12	SW_aug_13	1.00	0.79	.80	.95
13	SW_aug_14	1.25	1.07	.94	.95

Die Trennschärpen der Items zur Selbstwirksamkeit hinsichtlich AR waren mit Werten ab .50 bei allen Items außer SW1_aug unauffällig (vgl. Tabelle, 16) und korrelierten hoch mit der Skala. Bis auf die Eliminierung von SW1_aug waren keine weiteren Itemeliminierungen nötig. Mit $\alpha = .96$ wurde eine sehr gute Skalenreliabilität berechnet. Die deskriptive Analyse offenbarte eine geringe bzw. kaum ausgeprägte Selbstwirksamkeitserwartung bezüglich des Umgangs mit AR. Ihr Mittelwert lag mit $M = 1.16$ ($SD = 0.78$) unter dem möglichen Skalenmittelwert von 1.5 (vgl. Tabelle 16).

7.1.2 Akzeptanz und Usability

Der resultierende Fragebogen zur Akzeptanz und Usability enthält neun Skalen, die sich in die Dimensionen *Akzeptanz*, *Funktionale Bedienbarkeit*, *(Medien-) didaktische Gestaltung* und *Schultransfer* aufgliedern. Nachstehend werden die Akzeptanz-Skala sowie die Usability-Subskalen mit ihren Items, die in dem Forschungsprojekt zur Erfassung der Merkmale der Lernumgebung eingesetzt wurden, vorgestellt.

Akzeptanz. Die Itemanalyse bezüglich der Itemschwierigkeiten der Skala Akzeptanz ergab einen durchschnittlichen Schwierigkeitsgrad von ca. 79 %. Dies deutet auf eine erhöhte, aber dennoch mittlere Itemschwierigkeit hin. Die nähere Untersuchung der neun Items lieferte fünf Items mit einer Schwierigkeit > 80 %. Die Items waren demnach zu leicht, sodass sich eine Eliminierung bzw. Optimierung anschließen musste. Die Itemschwierigkeit von 93 % bei Item A1 führte zum Ausschluss. Die Items A3 und A5 wurden analog zu dem in den Einstellungen angeführten Beispiel hinsichtlich der sprachlichen Formulierung angepasst und im Schwierigkeitsniveau angehoben. In Hinblick auf das Modellverständnis wurde Item A7 aus der Skala ausgeschlossen. Bei der Analyse der Trennschärpen zeigte sich, dass die sieben Items der Akzeptanz-Skala eine innere Konsistenz mit einem Cronbachs alpha von .74 besitzen. Demnach konnte die Skala als brauchbar angesehen werden (Blaž, 2015). Bis auf Item A6 waren alle Items mit Werten größer .30 in ihren Trennschärpen unauffällig (s. Tabelle, 17). Obgleich Item A6 eine Trennschärfe von .03 aufzeigte und sich durch seine Eliminierung die Skalenreliabilität erhöhen würde, wurde das Item beibehalten. Der Ausschluss würde den α -Wert lediglich auf .79 anheben. Ferner beinhaltet das Item mit Blick auf die vorwissenschaftlichen Vorstellungen von Schülern einen wichtigen fachdidaktischen Aspekt, der für die Operationalisierung der Akzeptanz bedeutsam ist. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Technologie- und Naturwissenschaftsexperten das Lehr- und Lernangebot annehmen. Mit einer niedrigen Streuung um den Mittelwert ($M = 2.35$ und $SD = 0.47$) war die Akzeptanz hoch ausgeprägt.

Tabelle 17. Übersicht der Items aus der Skala Akzeptanz unter Angabe der Probandenanzahl (N), des Mittelwerts (M), der Standardabweichung (SD), der Trennschärfe (r_{it}) und der Reliabilität (α).

Akzeptanz					
<i>Skala: Akzeptanz (Skalenkürzel: A; Itemanzahl: 9)</i>					
<i>N = 18; M = 2.35; SD = 0.47; $\alpha = .74$</i>					
Nr.	Item	M	SD	r_{it}	α
1	A2	2.50	0.62	.53	.69
2	A3	2.67	0.59	.73	.65
3	A4	2.33	0.77	.60	.67
4	A5	2.56	0.70	.45	.71
5	A6	2.44	0.62	.03	.79
6	A8	2.39	0.70	.55	.68
7	A9	1.56	0.78	.35	.73

Usability: Didaktische Gestaltungskriterien. Die Subskala *Didaktische Gestaltung* enthielt ursprünglich die vier Zieldimensionen⁷, d.h. die Subskalen *Zielexplication*, *Angemessenheit der Anforderungen*, *Individualisierbarkeit* und *Problemorientierte Didaktik*. Obgleich die Items Z1 und Z2 der Subskala *Zielexplication* Itemschwierigkeiten mit Werten von 61 % und 50 % im akzeptablen Bereich aufzeigten (vgl. Anhang), wurde sich für deren Eliminierung entschieden. Die anfängliche Entwicklung des Fragebogens stützte sich stark auf Kopp et al. (2003) und begründete deren Einbindung. Die Lehr- und Lernziele werden jedoch in der AR-Lernumgebung nicht explizit genannt, weswegen die Items als Kontrollitems angesehen wurden und keinen direkten Aufschluss über die Usability gaben. Ferner sollte es – wenn nicht zwingend notwendig – vermieden werden eine Skala mit nur zwei Items zu bilden (vgl. Eisinga, 2013). Obgleich Kopp et al. (2003) derart vorgegangen sind, wird in dem Messinstrument aus inhaltlichen und statistischen Gründen auf die beiden Items und eine derart kurze Skala verzichtet. Nachdem die Skalenreliabilitätsanalyse niedrige Cronbachs alpha Werte $\leq .60$ in den Subskalen *Anforderungen*, *Individualisierbarkeit* lieferte, erfolgten Skalenneubildungen. Entsprechend umfasst die *Didaktische Gestaltung* nur noch die zwei Skalen *Individualisierbarkeit* und *Problemorientierte Didaktik*. In der Skala *Individualisierbarkeit* zeigt sich bei den drei Items eine Auffälligkeit in Item I3 mit einer Itemschwierigkeit von 87 %. Es schloss sich eine inhaltliche Überarbeitung dieses Items an, indem es sprachlich angehoben wurde (s. Fragebogen im Anhang). Trotz der guten Werte, bezogen auf die Trennschärfe, ergab die Skalenreliabilitätsanalyse einen Cronbachs alpha Wert von .60. In der Folge musste sich eine Skalenneubildung anschließen. Die 20 Items der Subskala *Problemorientierte Didaktik* lagen insgesamt im mittleren Itemschwierigkeitsbereich. Auffälligkeiten zeigten sich bei acht Items in Hinblick auf den jeweiligen Schwierigkeitsindex, der über 80 % lag. Demzufolge wurden sechs Items sprachlich überarbeitet. Mit den Items zur Modellkompetenz, die es zu eliminieren galt, wurden drei Items aus der Subskala ausgeschlossen. Daraus

⁷ Die Zieldimensionen werden im Folgenden als Subskalen betrachtet.

resultierte mit 17 Items eine Skalenreliabilität von .86 (vgl. Tabelle 18). Der gute Wert bezogen auf die innere Konsistenz der Skala konstatiert den Einschluss der restlichen auffälligen Items und spricht für den Beibehalt der Skala im finalen Fragebogen. Demnach lieferte die Subskala zur *Problemorientierten Didaktik* ein sehr zufriedenstellendes Ergebnis. Mit ihren vier Items kann auch die Subskala *Individualisierbarkeit* als brauchbar angesehen werden. Die Mittelwerte als Indikatoren für die didaktische Gestaltung lagen durchweg über dem mittleren Skalenniveau (vgl. Tabelle 18).

Tabelle 18. Übersicht der Items aus den Subskalen zur Usability – Didaktische Gestaltungskriterien unter Angabe der Probandenanzahl (N), des Mittelwerts (M), der Standardabweichung (SD), der Trennschärfe (r_{it}) und der Reliabilität (α).

Usability - Didaktische Gestaltungskriterien					
<i>Skala: Individualisierbarkeit (neues Skalenkürzel: I)</i>					
<i>N = 18; M = 2.35; SD = 0.44; α = .67</i>					
Nr.	Item	M	SD	r_{it}	α
1	I1	2.11	.758	.54	.54
2	I2	2.00	.767	.31	.71
3	I3	2.61	.608	.55	.54
4	St2	2.67	.485	.48	.60
<i>Skala: Problemorientierte Didaktik (Skalenkürzel: P_Did)</i>					
<i>N = 18; M = 2.32; SD = 0.41; α = .89</i>					
1	P_Did2	2.44	0.62	.20	.89
2	P_Did3	2.33	0.69	.69	.87
3	P_Did5	2.22	0.55	.54	.88
4	P_Did6	2.72	0.46	.53	.88
5	P_Did7	2.44	0.51	.73	.87
6	P_Did8	2.39	0.61	.47	.88
7	P_Did9	2.28	0.67	.55	.88
8	P_Did11	2.06	0.73	.42	.88
9	P_Did12	1.78	0.73	.56	.88
10	P_Did13	1.83	0.71	.55	.88
11	P_Did14	2.06	0.73	.33	.89
12	P_Did15	2.33	0.69	.66	.87
13	P_Did16	2.67	0.59	.60	.88
14	P_Did17	2.61	0.70	.69	.87
15	P_Did18	2.44	0.62	.57	.88
16	P_Did19	2.61	0.61	.46	.88
17	P_Did20	2.28	0.67	.50	.88

Anmerkung. Die angegebenen Itemabkürzungen sind auf die ursprünglich eingesetzten Skalen zurückzuführen.

Usability: Mediendidaktische Gestaltungskriterien. Die Itemanalysen in allen vier ursprünglichen Subskalen *Erwartungskonformität*, *Technische Bedienbarkeit*, *Steuerbarkeit* und *Selbsterklärungsfähigkeit* lieferten vermehrt Auffälligkeiten, entweder im Hinblick auf einen zu hohen Schwierigkeitsindex > 80 % oder die Trennschärfe mit Werten < .30 (vgl. Anhang). Entsprechend wurden die Items St1, St3, Se_E3, EK1, EK2, Tech_LF2, Tech_LF4,

Tech_LF11 eliminiert. Ferner lieferte die Reliabilitätsanalyse der beiden ursprünglichen Skalen *Steuerbarkeit* und *Selbsterklärungsfähigkeit* schlechte Werte der inneren Konsistenz mit $\alpha < .45$. Demnach wurden Skalenneukonstruktionen vorgenommen, sodass sich die zwei neuen Skalen *Technische Bedienbarkeit* und *Angemessenheit der Anforderungen* entwickelten. Dabei wird angemerkt, dass die Items Ang_Anf3, Ang_Anf4 und Ang_Anf5 der ursprünglichen Skala *Angemessenheit der Anforderungen* nach sprachlicher Überarbeitung aufgenommen wurden. Die Reliabilitäten der Skalen *Technische Bedienbarkeit* und *Angemessenheit der Anforderungen* lagen nach der Neuentwicklung mit $\alpha = .76$ und $\alpha = .67$ im akzeptablen Bereich. Es wurden zufriedenstellende Itemschwierigkeiten erreicht (s. Anhang). Bis auf Se_E1 zeigten sich die Trennschärfen unauffällig (vgl. Tabelle 19). Der Mittelwert für die technische Bedienbarkeit lag mit 2.19 deutlich über dem mittleren Skalenniveau. Die Skala *Angemessenheit der Anforderungen* war zwar mit $M = 1.88$ weniger stark ausgeprägt, deutet aber auf eine annehmbare instruktionale Unterstützung hin (vgl. Tabelle 19).

Tabelle 19. Übersicht der Items aus den Subskalen zur Usability – Funktionale Gestaltungskriterien unter Angabe der Probandenanzahl (N), des Mittelwerts (M), der Standardabweichung (SD), der Trennschärfe (r_{it}) und der Reliabilität (α).

Usability - Funktionale Gestaltungskriterien					
<i>Skala: Technische Bedienbarkeit (neues Skalenkürzel_Tech_LF)</i>					
<i>N = 18; M = 2.19; SD = 0.69; $\alpha = .76$</i>					
Nr.	Item	M	SD	r_{it}	α
1	Se_E1	2.33	0.69	-.05	.80
2	Se_E2	2.17	0.86	.52	.73
3	Tech_LF3	2.00	0.91	.82	.67
4	Tech_LF5	2.39	0.78	.49	.74
5	Tech_LF6	2.33	0.59	.61	.73
6	Tech_LF9	1.89	1.02	.33	.77
7	Tech_LF10	2.06	0.94	.51	.73
8	EK3	2.44	0.86	.32	.76
9	St4	2.11	0.76	.55	.73
<i>Skala: Angemessenheit der Anforderungen (neues Skalenkürzel: Ang_Anf)</i>					
<i>N = 18; M = 1.88; SD = 0.62; $\alpha = .67$</i>					
1	Ang_Anf3	1.94	0.64	.29	.66
3	Ang_Anf4	1.83	0.86	.34	.65
2	Ang_Anf5	1.89	0.90	.56	.56
4	Tech_LF1	2.44	0.70	.37	.64
5	Tech_LF7	0.94	0.73	.39	.63
6	Tech_LF8	2.22	0.88	.44	.61

Anmerkung. Die angegebenen Itemabkürzungen sind auf die ursprünglich eingesetzten Skalen zurückzuführen.

Usability: Mediendidaktische Gestaltungskriterien. Die Itemanalyse der Skalen *Verständlichkeit* und *Wirkung der Medien* ergab einige Auffälligkeiten bezüglich der Itemschwierigkeiten und der Trennschärfen der Items (vgl. Tabelle 20). Insgesamt lagen die Items im mittleren Itemschwierigkeitsbereich (vgl. Tabelle 20 Anhang). Dennoch stellten sich

bei der Verständlichkeit der Medien 12 Items und bei der Wirkung der Medien 13 Items als zu leicht mit Messwerten > 80 % heraus. Demzufolge wurden die Items entweder inhaltlich überarbeitet (vgl. Fragebogen im Anhang) oder eliminiert. Entsprechend wurden Ver_Me1, Ver_Me6, Ver_Me10, Wirk_Me5, Wirk_Me10, Wirk_Me14, Wirk_Me16, Wirk_Me17 und Wirk_Me20 ausgeschlossen.

Tabelle 20. Übersicht der Items aus den Subskalen zur Usability – Mediendidaktische Gestaltungskriterien unter Angabe der Probandenanzahl (N), des Mittelwerts (M), der Standardabweichung (SD), der Trennschärfe (r_{it}) und der Reliabilität (α).

Usability - Mediendidaktische Gestaltungskriterien					
<i>Skala: Verständlichkeit der Medien (Skalenkürzel: Ver_Me)</i>					
<i>N = 18; M = 2.48; SD = 0.52; α = .83</i>					
Nr.	Item	M	SD	r_{it}	α
1	Ver_Me2	2.44	0.70	.41	.82
2	Ver_Me3	2.17	1.10	.57	.81
3	Ver_Me4	1.67	1.03	.45	.82
4	Ver_Me5	2.72	0.57	.23	.83
5	Ver_Me7	2.67	0.59	.60	.81
6	Ver_Me8	2.39	0.70	.62	.80
7	Ver_Me9	2.56	0.51	.52	.81
8	Ver_Me11	2.67	0.59	.25	.83
9	Ver_Me12	2.50	0.71	.62	.80
10	Ver_Me13	2.67	0.77	.52	.81
11	Ver_Me14	2.78	0.43	.54	.81
12	Ver_Me15	2.56	0.70	.65	.80
<i>Skala: Wirkung der Medien (Skalenkürzel: Wirk_Me)</i>					
<i>N = 18; M = 2.38; SD = 0.51; α = .83</i>					
1	Wirk_Me1	2.61	0.50	.23	.83
2	Wirk_Me2	2.72	0.46	.38	.82
3	Wirk_Me3	2.28	0.67	.38	.82
4	Wirk_Me7	2.50	0.62	.18	.83
5	Wirk_Me4	2.28	0.75	.38	.82
6	Wirk_Me6	2.11	0.76	.80	.79
7	Wirk_Me9	2.67	0.59	.12	.83
8	Wirk_Me8	1.89	0.96	.62	.80
9	Wirk_Me11	2.17	1.04	.76	.79
10	Wirk_Me12	2.56	0.51	.14	.83
11	Wirk_Me13	2.06	0.87	.76	.79
12	Wirk_Me15	2.17	0.92	.75	.79
13	Wirk_Me18	2.89	0.32	-.08	.84
14	Wirk_Me19	2.39	0.61	.17	.83
15	Wirk_Me21	2.39	0.78	.63	.80

Die Skalenreliabilitätsanalyse lieferte anschließend in beiden Skalen ein Cronbachs Alpha von .83, das im akzeptablen Bereich lag (vgl. Bortz & Döring, 2016; Blanz, 2015). Die Mittelwerte als Indikatoren für die mediendidaktische Gestaltung lagen in beiden Subskalen sichtlich über

dem mittleren Skalenniveau. Dieser Befund verweist auf eine gute mediale Umsetzung der Lernumgebung (vgl. Tabelle 20).

Usability: Didaktik Schultransfer. Die Items der Skalen *Voraussichtliche Motivation* (7 Items) und *Voraussichtlicher Lernerfolg* (19 Items) lieferten mit wenigen Ausreißern Itemschwierigkeiten im mittleren Bereich. Es erfolgte eine Itemselektion, sodass die Items M4, LE_LT7 und LE_LT17 ausgeschlossen wurden (vgl. Tabelle 21). Diese Maßnahme stützt sich einerseits auf den zu leichten Items (vgl. Itemschwierigkeit von M4: 88.89 %) und andererseits auf dem Inhalt „Modellverständnis“, den es zu eliminieren galt (vgl. LE_LT7 und LE_LT17).

Tabelle 21. Übersicht der Items aus den Subskalen zur Usability – Didaktik Schultransfer unter Angabe der Probandenzahl (N), des Mittelwerts (M), der Standardabweichung (SD), der Trennschärfe (r_{it}) und der Reliabilität (α).

Usability - Didaktik Schultransfer					
Skala: <i>Voraussichtliche Motivation</i> (Skalenkürzel: M)					
N = 18; M = 2.32; SD = 0.39; α = .87					
Nr.	Item	M	SD	r_{it}	α
1	M1	2.44	0.62	.67	.85
2	M2	2.39	0.61	.63	.86
3	M3	2.33	0.69	.69	.85
4	M5	2.11	0.68	.49	.89
5	M6	2.28	0.57	.88	.82
6	M7	2.33	0.59	.75	.84
Skala: <i>Voraussichtlicher Lernerfolg</i> (Skalenkürzel: Le_LT)					
N = 18; M = 2.2; SD = 0.615; α = .90					
Nr.	Item	M	SD	r_{it}	α
1	LE_LT1	2.50	0.62	.16	.91
2	LE_LT2	1.78	1.11	.49	.90
3	LE_LT3	1.78	1.00	.44	.90
4	LE_LT4	2.78	0.43	.39	.90
5	LE_LT5	2.11	0.76	.40	.90
6	LE_LT6	2.50	0.51	.39	.90
7	LE_LT8	2.33	0.84	.69	.89
8	LE_LT9	2.28	0.57	.55	.90
9	LE_LT10	2.56	0.78	.59	.90
10	LE_LT11	2.39	0.78	.64	.90
11	LE_LT12	2.33	0.77	.71	.89
12	LE_LT13	1.72	1.02	.73	.89
13	LE_LT14	1.67	0.84	.62	.90
14	LE_LT15	2.22	0.81	.80	.89
15	LE_LT16	2.22	0.73	.72	.89
16	LE_LT18	2.06	0.80	.83	.89
17	LE_LT19	2.17	0.62	.55	.90

Da in beiden Subskalen gute bis sehr gute Skalenreliabilitäten mit $\alpha > .87$ verzeichnet werden konnten, wurden keine weiteren Items eliminiert. Es erfolgten lediglich inhaltliche Anpassungen, indem beispielsweise Superlative eingebunden wurden (z.B. LE_LT4). Die auffällige

Trennschärfe des Items LE_LT1 störte die innere Konsistenz der Skala kaum, weswegen auch auf dessen Eliminierung verzichtet wurde. Der Schultransfer wurde mit $M = 2.32$ für die voraussichtliche Motivation und $M = 2.2$ für den voraussichtlichen Lernerfolg sehr positiv eingeschätzt (vgl. Tabelle 21).

Zusammenfassung der Neuskalierungen zu einem finalen Fragebogen zur Erfassung der Akzeptanz und Usability. Wohingegen das Skala *Akzeptanz* nur zwei Itemeliminierungen erfuhr und sich als Skala für geeignet erwies, mussten zahlreiche Änderungen für die Operationalisierung der Usability vorgenommen werden. Es wurde sich bei der anfänglichen Fragebogenentwicklung für die Einbindung der funktionalen Aspekte in die Skala *Mediendidaktische Gestaltung* (vgl. Kapitel 6.4.2) entschieden. Zur Sicherstellung der Validität wurde nun zusätzlich die Skala *Funktionale Gestaltungskriterien* integriert. Auf Basis der oben angeführten Maßnahmen (Itemanpassungen und –eliminierungen) konnten einige Skalen weitgehend übernommen werden. Dabei handelt es sich um die von Kopp et al. (2003) adaptierten Skalen *Problemorientierte Didaktik*, *Verständlichkeit der Medien*, *Wirkung der Medien* und *Didaktik: Schultransfer*. Die zum Teil sehr kurzen Skalen zur Angemessenheit der Anforderungen, Individualisierbarkeit, Steuerbarkeit, Selbsterklärungsfähigkeit, Erwartungskonformität und technische Lernförderlichkeit, vorrangig adaptiert nach Prümper (2008) und Bürg (2005), durchliefen strikte Itemeliminierungen, die zwangsläufig Skalenneukonstruktionen erforderten. Vor allem mit Blick auf die inhaltliche Validität (vgl. Kapitel 6.3) wurden einzelne Items zu neuen Skalen zusammengefasst. Demnach wurde die Skala *Didaktische Gestaltung* um ihre *Subskalen Zielexplikation* und *Angemessenheit der Anforderungen* gekürzt. Die didaktischen Gestaltungskriterien subsumieren nun die *Technische Bedienbarkeit* und *Instruktionale Unterstützung*. Abbildung 21 liefert eine Übersicht der Haupt- und Subskalen des Fragebogens zur Erfassung der Akzeptanz und Usability. Dabei werden vor allem auch die Skalenveränderungen und finalen Itemanzahlen aufgezeigt. Hinsichtlich der gebildeten Skalen zur Akzeptanz und Usability waren die Werte der Stichprobe recht hoch ausgeprägt. Die Technologie- und Naturwissenschaftsexperten bewerteten die AR-Lernumgebung mit Blick auf den perspektivischen Einsatz im Chemieunterricht zur Förderung des Stoff-Teilchen-Konzeptverständnisses und der chemischen Fachsprache gut.

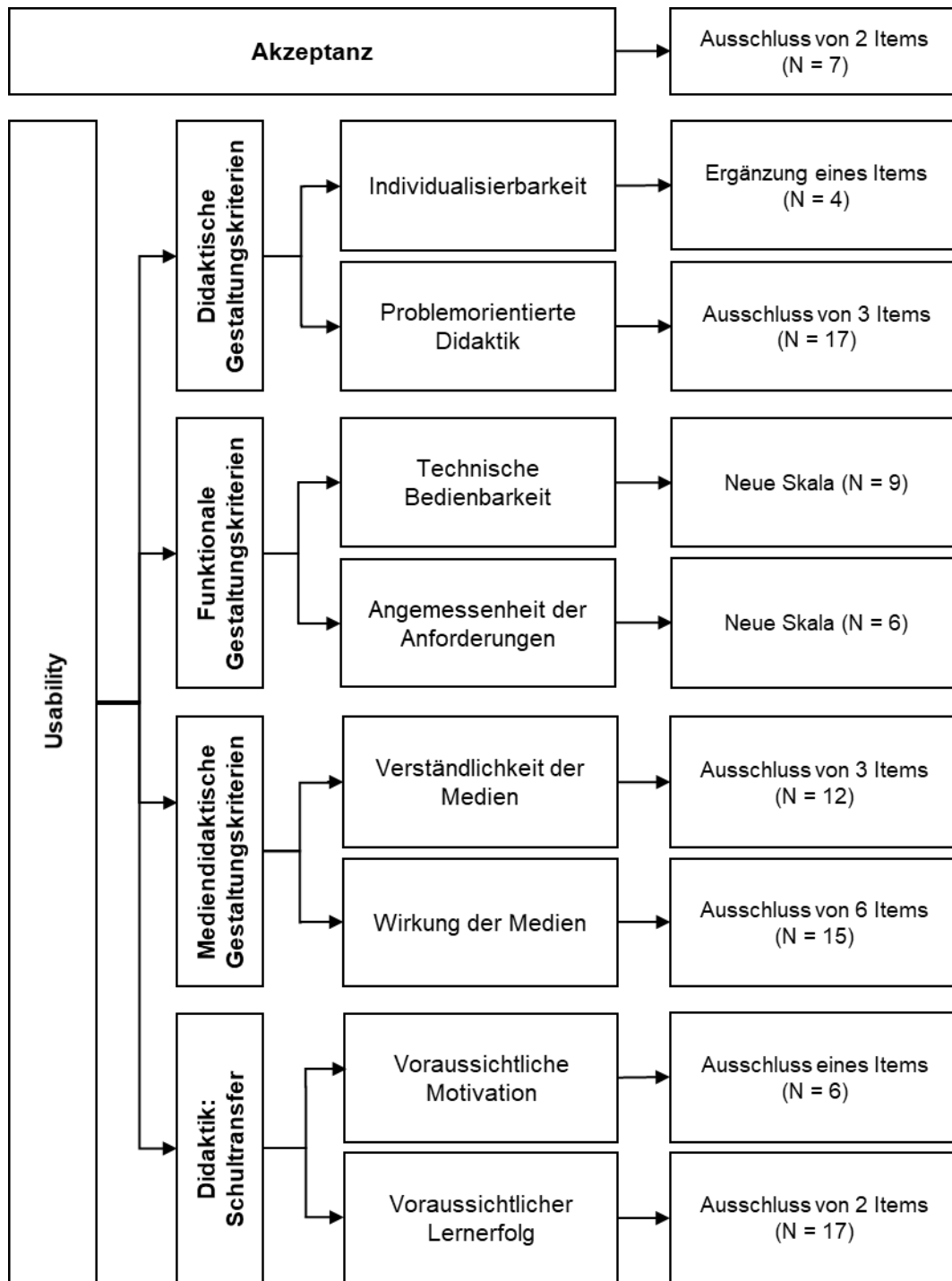


Abbildung 21. Übersicht des finalen Fragebogens zur Erfassung der Akzeptanz und Usability mit seinen Subkonstrukten und (neuen) Zieldimensionen vor dem Hintergrund der Itemselektion und (Neu-) Skalierung; N bezeichnet die Anzahl der Items einer Skala.

Offene Fragen zur Erfassung der Usability. Die Teilnehmenden gaben an, dass ihnen aus fach- und mediendidaktischer Sicht besonders gut an der AR-Lernumgebung die Darstellung der Prozesse auf Teilchenebene in Echtzeit sowie die Differenzierung zwischen Stoff- und Teilchenebene bei realer Versuchsdurchführung gefallen hat. Zudem wurden die interaktiven (dynamischen) Repräsentationen sowie deren adäquate Wechsel überwiegend positiv bewertet. Mehrfach wurde die Lernumgebung als höchst motivierend beschrieben. Auch beurteilten sie die Handhabung meist als intuitiv und lobten die selbstregulierte Steuerung der Lernumgebung. Optimierungsbedarf lag in der Orientierung bzw. Navigation der AR-Lernumgebung und dessen Layout vor. Die Befragten äußerten, dass die Instruktionen ausgebaut werden müssen und die Aufgabenstellungen klarer formuliert werden müssen, um kognitive Lernprozesse anzuregen. Überdies muss die interaktive Geschwindigkeitssteuerung stärker mit dem Versuch verbunden werden. Als potenzielle Schwachstellen hinsichtlich des perspektivischen Unterrichtseinsatzes wurden Schülervorstellungen zum Teilchenkonzept, die hervorgerufen werden könnten, genannt. Dabei scheint die Betrachtung der Teilchen im Diskontinuum (vgl. Kapitel 6.4) nicht klar ersichtlich zu sein. Ferner muss der Modellcharakter bei den Prozessen auf Teilchenebene stärker betont und der Transfer von Stoff- auf Teilchenebene erläutert werden. Letztlich merken die Befragten an, dass das Setting mehr Bewegungsfreiheit erlauben sollte. Es wäre wünschenswert, wenn die Position des Tablets verändert und beispielsweise rund um den Versuchsaufbau bewegt werden kann. Überdies wurden weitere Aussagen getätigt. Beispielsweise wurde der Wunsch eines Glossars für Begriffsdefinitionen geäußert. Des Öfteren wurde die AR-Lernumgebung dem Video gegenübergestellt.

7.2 Zusammenfassung und Implikation für die Hauptstudien

7.2.1 Fragebögen

Mit der Vorstudie sollte untersucht werden, ob die entwickelten Fragebögen den wissenschaftlichen Ansprüchen genügen (vgl. Kapitel 5.1), indem sie valide und reliabel die Merkmale des Individuums und der Lernumgebung sowie die Akzeptanz abbilden. Die Ergebnisse aus Kapitel 7.1 sollten belegen, dass die Erhebungsinstrumente für die Erfassung der genannten Merkmale geeignet sind. Da es sich bei der Zielgruppe vorrangig um Chemielehrkräfte (s. Hauptstudie 1; Kapitel 8.1) und bei der AR-Lernumgebung um ein sehr fachspezifisches Material handelt, wurden die Fragebögen stark auf den Bereich Chemie mit Blick auf das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis und den Umgang mit (M)ER eingegrenzt. Es wurde sich bewusst gegen die Einbindung weiterer fachinhaltlicher Facetten wie der chemischen Modellierung entschieden (s.o. Kapitel 7.1). Ferner sollten die Erhebungsinstrumente nicht das gesamte Spektrum an fach- und prozessbezogenen Lehr- und Lerninhalten aus dem MINT-Fächern umfassen. Der Verzicht dieser und weiterer Fachinhalte stützt sich auf dem Schwerpunkt der Hauptuntersuchung und der Zumutbarkeit des Tests.

Laut Figl (2010) werden die Reliabilitäten in Erhebungen zur Usability kaum berichtet, sind aber für die Skalenbildung entscheidend. Der Fragebogen zur Erfassung der Personenmerkmale erwies sich als sehr brauchbar. Dennoch wird darauf hingewiesen, dass sich die Subskala TK-SW zur Operationalisierung der Selbstwirksamkeit hinsichtlich TK aus mehr als nur zwei Items zusammensetzen sollte (vgl. Eisinga et al., 2013). Aus genannten Gründen bezogen auf die Testlänge (s.o. Kapitel 7.1.1) wurde diese Skala jedoch nicht weiter ausgebaut. Neuskalierungen wurden vor allem im Usability-Fragebogen vorgenommen. Werden die ursprünglichen und finalen Skalen *Didaktische* und *Mediendidaktische Gestaltungskriterien* (vgl. Abbildung 16 und Abbildung 21 in Kapitel 7.2.1) miteinander verglichen, so können starke Veränderungen festgestellt werden. Insbesondere die Items der sehr kurzen Usability-Skalen wurden inhaltlich umstrukturiert und durch Einbindung der *Funktionalen Gestaltungskriterien* neuskaliert. Aus Kapitel 7.1.2 resultiert, dass diese drei Usability-Subskalen mit α -Werten $> .60$ für brauchbar angesehen werden können (vgl. Bortz & Döring, 2016). Dabei wurden die Items nicht nur hinsichtlich der chemischen Teilbereiche *Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis* („Die Veranschaulichung der Redoxreaktionen bzw. Elektrolyse von Zinkiodid an einem authentischen Fall - dem realen chemischen Versuch im Labor - ist für das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis hilfreich.“) und *Chemische Fachsprache* („Die Bilder sind inhaltlich verständlich.“) sondern vermehrt in Bezug auf die technischen Rahmenbedingungen („Die AR-Lernumgebung bietet einen guten Überblick über den Aufbau und das Funktionsangebot in den verschiedenen Lernpfaden.“) ausdifferenziert. Vereinzelt lagen Items mit geringer Trennschärfe vor, die nicht selektiert wurden: Es wird vermutet, dass die feingliedrigen Itemformulierungen, den Korrelationskoeffizienten zum Teil negativ beeinflussten. Ferner scheint es der Neuheitsgrad der technischen Innovation AR zu sein, der sich gelegentlich (negativ) auf die Trennschärfe auswirkte. Diese Items sind jedoch in den meisten Fällen unumgänglich für eine aussagekräftige, fach- und mediendidaktische Bewertung der AR-Lernumgebung und sollten nicht ausgeschlossen werden. Alle anderen Subskalen zur Erfassung der Personenmerkmale, Akzeptanz und Usability zeichnen sich überwiegend mit α -Werten $> .80$ durch gute bis hin zu exzellenten Werten der inneren Konsistenz aus (vgl. Bortz & Döring, 2016; Kuckartz et al., 2013). Lieferte die Reliabilitätsanalyse der finalen Subskalen *Instruktionale Unterstützung*, *Technische Bedienbarkeit* und *Individualisierbarkeit* auch nach der Itemselektion gerade noch akzeptable Werte zwischen $.65$ und $.80$ (vgl. Kapitel 7.1.2), so lässt sich dies womöglich durch die Zusammenfassung einzelner Items aus verschiedenen theoretischen Konstrukten erklären. Überdies könnten die mäßigen Werte der internen Konsistenz auf den innovativen und damit unbekanntem Charakter von AR im chemischen Kontext zurückgeführt werden. Obgleich die ursprünglichen Skalen zur Funktionalität nach Bürg (2005) bessere Ergebnisse lieferten, handelte es sich dabei um andere Fachbereiche. Zudem ist der Forschungsstand bezüglich digitaler Formate wie E-Learning (vgl. Bürg, 2005) wissenschaftlich weit fortgeschrittener als

bei technischen Innovation wie AR. Im Vergleich dazu hebt sich das Resultat der Skala *Problemorientierte Didaktik* mit $\alpha > .88$ positiv von der Literatur ab: Bei Kopp et al. (2003) wurde eine innere Konsistenz von .65 aufgezeigt. Dies lässt sich vermutlich durch die vorgenommenen Anpassungen hinsichtlich der Skalenlänge (von $n = 4$ auf $n = 17$) und der fachspezifischen Inhaltsüberarbeitung begründen.

Es wird geschlussfolgert, dass nach mehreren Reflexions- und Überarbeitungsschleifen der Usability- (Sub-) Skalen insgesamt ein zufriedenstellendes Erhebungsinstrument entwickelt wurde. Demnach sollten sich beide Fragebögen für den Einsatz in Hauptstudie 1 zur Beantwortung der Forschungsfragen aus Kapitel 5.2 eignen.

7.2.2 AR-Lernumgebung

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Pilotierung diskutiert, Konsequenzen für die Gestaltung der AR-Lernumgebung und Implikationen für die weiteren Forschungen in Hauptstudie 1 und 2 abgeleitet.

Personenmerkmale als Voraussetzungen für die Beurteilung der Usability. Bei den Versuchspersonen handelte es sich um (ehemalige) Personen aus dem Bildungsbereich, die sich durchweg beruflich oder/und privat mit der Digitalisierung beschäftigen. Dies gibt Aufschluss über die tendenziell hohen Werte bei den Einstellungs- und Selbstwirksamkeitsskalen, insbesondere in der Domäne *digitale Medien*. In Anlehnung an Vogelsang et al. (2019) kennen und nutzen die Versuchspersonen jedoch vorrangig Standardnutzungsformen digitaler Lehr- und Lernwerkzeuge (Lernvideo oder Text- und Bildverarbeitungsprogramme). Laut Angaben der Teilnehmenden liegen im Durchschnitt wenige bis kaum Berührungspunkte mit AR hinsichtlich des Einsatzes für den Chemieunterricht vor. Diese Daten stehen im Einklang mit den Ergebnissen von Vogelsang et al. (2019). Dabei wurde deutlich, dass angehende MINT-Lehrkräfte in ihrem Lehramtsstudium digitale Medien eher wenig in lernbezogenen Situationen genutzt haben und nahezu keine lernbezogenen Vorerfahrungen mit der High-End-Technologie haben. Insofern verwundert es nicht, dass in der vorliegenden Untersuchung die Einstellungen zu digitalen Medien stärker ausgeprägt als zu AR waren. Ferner erweckt die deskriptive Statistik den Anschein, als wären die Versuchspersonen skeptisch hinsichtlich der Möglichkeiten von AR. Dieser Eindruck spiegelt sich auch in den Antworten der offenen Fragen wider. Vermehrt wurden von den Teilnehmenden beispielsweise Videos zum Vergleich herangezogen. Schließlich sind die Selbstwirksamkeitserwartungen zu AR sehr viel geringer als die zu digitalen Medien ausgeprägt. Durch den innovativen Charakter von AR fehlt es den Versuchspersonen vermutlich an Erfahrung, was sich wiederum auf die Einschätzung der eigenen Fähigkeiten ausgewirkt haben könnte (vgl. Graham et al., 2009; Bosse et al., 2017).

Akzeptanz und Usability. Die Lernumgebung wurde inhaltlich und technisch mit dem Ziel konzipiert, ein hohes Maß an Effektivität, Effizienz und Zufriedenheit (Usability) bei den Nutzenden zu erreichen (vgl. Figl, 2010). Die hohen Werte in der Skala *Akzeptanz* und die Aussagen bei Beantwortung der offenen Fragen lassen den Schluss zu, dass die Versuchspersonen die AR-Lernumgebung positiv einschätzten und folglich akzeptierten (vgl. Bürg, 2005). Die Ergebnisse der Merkmale der Lernumgebung weisen darauf hin, dass die funktionale, didaktische sowie mediendidaktische Gestaltung der AR-Lernumgebung gut umgesetzt werden konnten. Der im Verhältnis niedrige Mittelwert in der Skala *Instruktionale Unterstützung* verwundert nicht. Es handelte sich bei der AR-Lernumgebung zum Pilotierungszeitpunkt um eine beta-Version. Konzeptionell war das Setting der App weit vorangeschritten, jedoch blieben bei der Programmierung Aspekte des Layouts und der Navigation unberücksichtigt. Es war der Versuch den Probanden die Möglichkeit einer vollkommen individuellen Selbststeuerung der App zu unterbreiten. Diese Individualisierbarkeit wurde, wie die Daten zeigen, auch erreicht. Im Umkehrschluss fühlten sich einige der Versuchspersonen bei der Bearbeitung der Lernumgebung zu sehr auf sich alleingestellt. Dies liegt womöglich daran, dass die Einbettung der Aufgabenstellungen in der AR-Lernumgebung fehlte. Obgleich die Aufgaben zu Beginn von der Versuchsleitung geäußert wurden, reichte das Vorgehen für eine erfolgreiche Elaboration nicht aus. Zudem waren es die technischen Rahmenbedingungen (s. Skala *Technische Bedienbarkeit* in Kapitel 7.1.2), die zwar positiv, aber nicht perfekt bewertet wurden. Das Tablet musste statisch an einer Position fixiert bleiben. Dies schränkte den Handlungsfreiraum und das selbstregulierte Arbeiten der Testpersonen ein (vgl. *Extraneous Load* nach Sweller, 2011). Die technische Programmierung von Perspektivenwechsel, inklusive Vergrößerungs- und Verkleinerungsoptionen, gestaltete sich in dem beschriebenen Setting als sehr komplex. Kontrastfreie Geräte und Chemikalien wie in der Chemie üblich (z.B. U-Rohr mit farbloser Zinkiodidlösung) können nur schwer getriggert werden (Tschiersch et al., 2021). Es müssen mehrere Sensoren, die die Positionen und Orientierungen der realen Gerätschaften erfassen, an dem Versuchsaufbau angebracht werden (Maier, 2014). Dieses Bedienelement konnte zum Zeitpunkt der ersten Erhebung noch nicht umgesetzt werden. Die Ergebnisse machen aber deutlich, dass es dieser technischen Funktion bedarf. Im Zuge der App-Modifizierung muss an der Beweglichkeit des Tablets gearbeitet werden. Orientiert an Goodhue (1995) gilt es daher die Ebenen „Aufgabe“ und „Technologie“ als Einflussfaktoren auf die Akzeptanz in der AR-Lernumgebung zu optimieren. Wird die konzeptuelle Aufmachung der AR-Lernumgebung betrachtet, so muss insgesamt die Interaktivität der App optimiert werden. Die Besonderheit der AR-Lernumgebung sollte in der dreidimensionalen Modelldarstellung der Prozesse auf Teilchenebene liegen, indem der Nutzer die 3D-Modelle während des Versuchsablaufs aus verschiedenen räumlichen Perspektiven betrachten kann (vgl. Azuma, 1997). Die Geschwindig-

keitsänderungen der Teilchenprozesse standen in der beta-Version in keinerlei Zusammenhang mit der realen Versuchsdurchführung. Die Versuchsteilnehmenden hatten zum Zwecke des selbstregulierten Lernens die Möglichkeit die Teilchenprozesse schneller oder langsamer abzuspielen (vgl. Bannert, 2009), jedoch änderte sich dabei nichts an der realen Versuchsdurchführung. Eine Lücke bei der Kombination von Realität und Virtualität war entstanden, die insbesondere bei Lernenden mit einem geringen Vorwissen den Wissensaufbau zur Stoff- und Teilchenebene stören könnte (vgl. Johnstone, 1993). Angesichts dessen ist es unerlässlich in die AR-Lernumgebung einen Hinweis zu integrieren, dass mit an- bzw. absteigender Geschwindigkeit der virtuellen Teilchen zugleich die reale Spannung erhöht bzw. erniedrigt werden muss. Diesbezüglich merkten die Testpersonen in den offenen Fragen an, dass Vorsicht bei der medialen Darstellung der Prozesse auf Teilchenebene geboten ist. Begründet durch die didaktische Reduktion und Rekonstruktion (vgl. Reinfried et al., 2009) wurde die AR-Lernumgebung wie in Kapitel 6.4 beschrieben konstruiert. Dennoch sollte, um (Fehl-) Vorstellungen bei den Nutzern zu vermeiden (vgl. Kapitel 2.2), auf das Diskontinuumskonzept verwiesen werden (ISB, 2023b). Andernfalls könnte der Lernende denken, die Teilchen befinden sich in begrenzter Anzahl und Beweglichkeit in der Flüssigkeit. Es muss eine Randbemerkung (Animation mit einer Super-Lupe vor Bearbeitung des Lernpfads) ergänzt werden, die bei der *Diffusion* und *Elektrolyse von Zinkiodid* auf die aquatisierten Ionen und das Vorhandensein bzw. die Hydratation der Wassermoleküle aufmerksam macht (s. auch finale Lernumgebung in Kapitel 8.3). Um eine Vermischung von Stoff- und Teilchenebene und einen Übertrag der Stoffeigenschaften auf die Teilchenebene zu vermeiden (ISB, 2023b), sollten überdies die Farben der Teilchen (Ionen, Moleküle, Elektronen) überarbeitet werden. Angesichts dessen wäre es nützlich, Definitionen zu Stoffebene, Teilchenebene und repräsentativer Ebene (vgl. Johnstone, 2000) einzubinden. Ziel dieser zusätzlichen Informationen soll es sein, das Vorwissen aufzufrischen und insbesondere den Modellcharakter (beispielsweise Farbigkeit der Moleküle oder Atome; Scheiter & Eitel, 2015) bei der Veranschaulichung der Prozesse auf Teilchenebene zu verdeutlichen (vgl. Kapitel 8.3).

Obgleich ein Optimierungsbedarf in der Aufbereitung der AR-Lernumgebung deutlich wurde, scheint das Setting sehr viel Anklang bei den Testpersonen gefunden zu haben. Das Datenmaterial (s. Kapitel 7.1.2) unterstreicht die motivationsfördernde Programmierung der AR-Lernumgebung. Einerseits lässt sich dies durch die Konzeption begründen. Andererseits könnte es die Innovation AR selbst sein, die aufgrund ihres Neuheitsgrads Interesse bei den Nutzern weckte (vgl. Lauer & Peschel, 2021; Wyss et al., 2021). Auch die positiven Einschätzungen zum selbstregulierten Arbeiten lassen sich durch den innovativen Charakter der Technologie oder der zugrundeliegenden App-Konzeptionierung erklären (vgl. Bürg, 2005). Laut Aussagen wurden die meisten Versuchsteilnehmenden zur bewussten Auseinandersetzung mit der Stoff-

und Teilchenebene, sowie deren Wechsel, aufgefördert. Auch die Implementierung der drei Repräsentationsformen, wurde vermehrt positiv bewertet.

Nach erfolgreicher Überarbeitung des Evaluationsdesigns, im Sinne der Anpassung der Erhebungsinstrumente (vgl. Kapitel 7.2.1) und Optimierung der AR-Lernumgebung (vgl. Kapitel 8.3), können diese in Hauptstudie 1 und 2 eingesetzt werden. Es wird hervorgehoben, dass die Lernumgebung nach erfolgreicher Modifikation zusätzlich als Simulation aufbereitet und überdies auf das High-End-Technologiesystem HMD-AR übertragen wird.

V HAUPTSTUDIE 1

8 Materialien und Methoden Hauptstudie 1

8.1 Stichprobe

Für die Datenerhebung wurden (angehende) Lehrkräfte aus dem MINT-Bereich, vorrangig mit Unterrichtsfach Chemie, eingeladen, an einer Fortbildung zu Thema *Augmented Reality für den MINT-Unterricht* mit zugehöriger Studie teilzunehmen. Insgesamt nahmen 157 Probanden (66 % Frauen, 34 % Männer) an der ersten digitalen Befragung zu den Einstellungen und Selbstwirksamkeitserwartungen hinsichtlich digitaler Medien bzw. AR teil. Den Usability- und Akzeptanz-Test zur Beurteilung der AR- bzw. digitalgestützten Lernumgebung bearbeiteten 122 Lehrkräfte (65 % Frauen, 35 % Männer). Das Durchschnittsalter lag insgesamt zwischen 31 bis 40 Jahren ($M = 36$ Jahre, $SD = 8.8$ Jahre). Da die Akquise über die sozialen Netzwerke erfolgte, weitete sich das örtliche Spektrum der Probanden aus. Demzufolge erstreckte sich die Datenerhebung über acht deutsche Bundesländer und die Steiermark hinweg. Tabelle 22 liefert eine Übersicht der Häufigkeitsverteilungen im Hinblick auf die Standorte der Probanden in beiden Befragungen.

Tabelle 22. Häufigkeitsverteilung der Lehrkräfte hinsichtlich ihrer Standorte in Hauptstudie 1 (Befragung 1: N = 148, Befragung 2: N = 107).

Bundesland	Befragung 1 (Personenmerkmale)		Befragung 2 (Usability/Akzeptanz)	
	Häufigkeit	Prozent	Häufigkeit	Prozent
Baden-Württemberg	12	8.1	9	8.4
Bayern	109	73.6	81	75.7
Bremen	3	2.0	3	2.8
Mecklenburg-Vorpommern	1	.7	-	-
Niedersachsen	1	0.7	1	0.9
Nordrhein-Westfalen	12	8.1	8	7.5
Rheinland-Pfalz	1	0.7	-	-
Saarland	1	0.7	-	-
Sonstiges (z.B. Österreich)	8	5.4	5	4.7
Gesamt	148	100	107	100

In beiden Umfragen stammt der größte Stichprobenanteil aus dem Bundesland Bayern, gefolgt von Baden-Württemberg und Nordrhein-Westfalen (vgl. Tabelle 22). Die Abbruchquote nach Teilnahme an der ersten digitalen Umfrage ist größtenteils auf Corona bedingte Maßnahmen (z.B. Besuchsverbote an Schulen) oder Erkrankungen zurückzuführen. Die Präsenztreffen zur Testung und Evaluierung der Lernumgebungen konnten in diesen Fällen nicht stattfinden. Die Stichprobe der ersten Befragung setzt sich erwartungsgemäß aus einer sehr ähnlichen Unterrichtsfachbelegung im Vergleich zu der Abschlussbefragung zusammen.

Bei den teilnehmenden Lehrkräften handelte es sich um MINT-Lehrkräfte, die mit Blick auf die Beurteilung der Lernumgebung zur Elektrolyse von Zinkiodid das Fach Chemie unterrichten

sollten. Tabelle 23 ist zu entnehmen, dass zwar vorrangig Lehrende mit Unterrichtsfach Chemie an der Erhebung teilnahmen, jedoch mit Blick auf die prozentuale Verteilung „nur“ 93.5 % den Usability- und Akzeptanz-Test ausfüllten. Einerseits konnten mit N = 107 nicht alle Probanden aus der Befragung zur Akzeptanz und Usability hinsichtlich ihrer Unterrichtsfächer erfasst werden. Andererseits wurde es auch aufgeschlossenen Lehrkräften aus anderen naturwissenschaftlichen Teildisziplinen gestattet die Lernumgebung zu testen und zu evaluieren. Als Argument wird angeführt, dass die Applikation auf Konzepten wie zum Beispiel dem Stoff-Teilchen-Ebenenwechsel (vgl. Kapitel 6.4 und 8.3) fußt, die auch in anderen naturwissenschaftlichen Fächern wie der Biologie oder Physik wesentlicher Bestandteil des naturwissenschaftlichen Denkens sind.

Tabelle 23. Häufigkeitsverteilung der Lehrkräfte hinsichtlich ihrer Unterrichtsfächer in Hauptstudie 1 (Befragung 1: N = 148, Befragung 2: N = 107); Mehrfachnennung möglich.

Unterrichtsfach	Befragung 1 (Personenmerkmale)		Befragung 2 (Usability/Akzeptanz)	
	Häufigkeit	Prozent	Häufigkeit	Prozent
Bio	81	54.7	59	55.1
Chemie	136	91.9	100	93.5
Physik	9	6.1	7	6.5
Informatik	6	4.1	5	4.7
Mathematik	39	26.4	27	25.2
Gesamt	271	183.2	198	185

Die überdurchschnittlich hohe Teilnahme an bayerischen Lehrkräften (s.o. Tabelle 23) erklärt mit ca. 55 % in beiden Befragungen eine hohe Belegung des Fachs Biologie. Schließlich ist die Fächerkombination Chemie und Biologie sehr gängig in Bayern. Ein Viertel der Probanden aus beiden Erhebungen unterrichtet Mathematik. Als weitere Unterrichtsfächer werden die Fächer Physik und Informatik mit nur geringen Häufigkeiten angegeben. Überdies gaben die Lehrkräfte an, vorrangig in den Klassen 8 bis 10 zu unterrichten.

Die nachstehenden Werte beziehen sich auf die Erfassung der demografischen und persönlichen Daten aus der ersten Befragung zu den Personenmerkmalen (N = 148):

Mit ca. 60 % unterrichten die meisten Lehrkräfte an Gymnasien (N = 88). Die restlichen Schulformen „Realschule“ (N = 21), „Fach- und Berufsoberschule“ (N = 19) und „Sonstiges wie z.B. „Höhere Technische Lehranstalten“ (N = 20) sind bei Sichtung der Stichprobendaten mit jeweils ca. 13 % sehr ähnlich verteilt. Ferner weisen über die Hälfte der Lehrpersonen eine Dienstzeit von mindestens sechs Jahren auf (N = 86) und können daher als erfahrene Lehrpersonen angesehen werden (vgl. Hubermann, 1991). Weitere 25 Lehrpersonen sind seit vier bis sechs Jahren im Dienst und befinden sich damit in einer Stabilisierungsphase, die auf eine

mäßige bis leicht erhöhte Berufserfahrung schließen lässt. Die restlichen Studienteilnehmenden (N = 37) arbeiten höchstens seit drei Jahren als Lehrkraft an einer Schule und werden daher als unerfahren eingestuft (vgl. Hubermann, 1991).

Von den 157 Probanden, die den Test zu den Personenmerkmalen beantworteten, gaben alle Probanden an privat digitale Medien, beispielsweise für Kommunikations- oder Unterhaltungszwecke („Social Media“ oder „Youtube-Videos“) zu nutzen und diese auch regelmäßig in ihren Unterricht einzubinden. Dabei werden vermehrt herkömmliche digitale Lernanwendungen wie Videos oder Präsentationen genannt. 5 Probanden erklärten AR privat (z.B. „PokemonGo“ aus dem Gamification-Bereich) zu nutzen. Überdies haben laut Angaben 14 Lehrkräfte AR bereits in ihrem eigenen Fachunterricht eingesetzt. Über 60 % der Lehrenden (N = 98) erklärten, sich regelmäßig digital weiterzubilden (z.B. Messwerterfassung oder Kennenlernen von Anwendungen wie „Book Creator“). Unter dieser Teilmenge befinden sich 16.3 %, die mindestens eine Fortbildung zu AR (z.B. Einsatz der AR-App „Blippar“) besucht haben (N = 16).

8.2 Forschungsdesign

Angesichts des in Kapitel 5.2 geschilderten Ziels von Hauptstudie 1 wird im Folgenden das zugehörige Forschungsdesign der (explorativen) Vergleichsstudie für die drei Gruppen – Simulation (Sim), AR und HMD-AR – vorgestellt. Abbildung 22 liefert eine Übersicht der unabhängigen und abhängigen Variablen (UV und AV) des Forschungsdesigns.

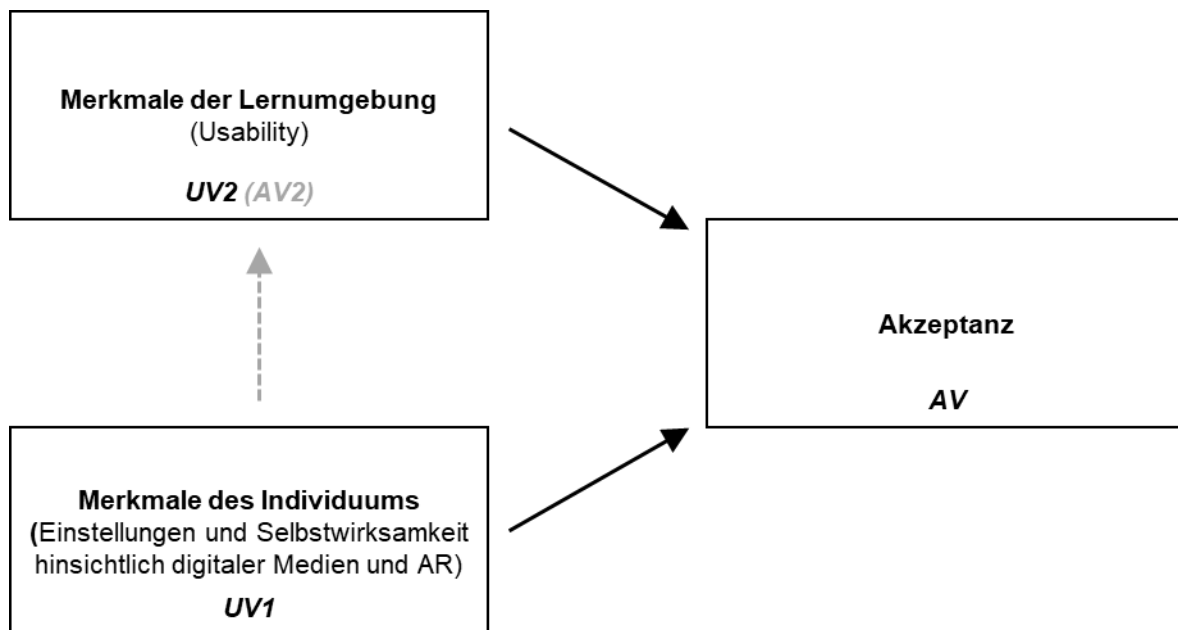


Abbildung 22. Studiendesign von Hauptstudie 1 mit unabhängigen Variablen UV1/2 und abhängiger Variable(n) AV(2).

Als erste unabhängige Variable (UV1) wurden die Merkmale des Individuums hinsichtlich der Einstellungen und Selbstwirksamkeitserwartungen im Kontext digitale Medien und AR über vier Hauptskalen operationalisiert (vgl. Kapitel 7.1.1). Ferner wurde die Usability als weitere unabhängige Variable UV2 eingesetzt. Hierfür gehen acht Skalen zu den Merkmalen der Lernumgebung als UV2 in die Analyse ein (vgl. Kapitel 7.1.2). Dabei sieht das Forschungsdesign vor, dass die Merkmale des Individuums (UV1) und die Usability (UV2) auf die Akzeptanz (AV) wirken. Demnach wurde die Akzeptanz als abhängige Variable mithilfe einer Skala, bestehend aus sieben Items (vgl. Kapitel 7.1.2), erhoben. Überdies wird davon ausgegangen, dass die Usability zugleich als abhängige Variable AV1 durch die Merkmale des Individuums (UV1) beeinflusst wird und demnach die Effekte der Personenmerkmale auf die Akzeptanz (AV) teilweise vermittelt. In Hauptstudie 1 wurden die zwei pilotierten Erhebungsinstrumente zur Erfassung der Merkmale des Individuums (Vorbefragung) bzw. der Lernumgebung (Abschlussbefragung) aus der Vorstudie eingesetzt (vgl. Kapitel 7.1).

8.3 Gestaltung der finalen AR-Lernumgebung

Um die Forschungsfragen von Hauptstudie 1 (s. Kapitel 5.2) beantworten zu können, wurde die in der Vorstudie vorgestellte AR-Lernumgebung (s. Kapitel 6.4) weiterentwickelt. Dabei stützt sich die Umkonzeptionierung nach wie vor auf dem Modell zur Entwicklung einer AR-Lernumgebung für den Chemieunterricht aus Kapitel 6.4 (vgl. Abbildung 17) und den darin enthaltenen kognitions- bzw. instruktionspsychologischen Gestaltungskriterien nach Mayer (2005), Bürg (2005), Kopp et al. (2003) und Prümper (2008). Aus den Ergebnissen der Vorstudie (vgl. Kapitel 7) wurde abgeleitet, dass ein Optimierungsbedarf hinsichtlich der technischen und inhaltlichen Aufbereitung vorliegt. Demzufolge war es notwendig, weitere technische Funktionen einzubauen und das User Interface (UI, deutsch: Benutzerschnittstelle) hinsichtlich des Layouts und der Navigation anzupassen. Des Weiteren musste das fachdidaktische Konzept überarbeitet werden. Der Aufbau der Lernpfade wurde fachdidaktisch und medial modifiziert, indem diese umstrukturiert, zusätzliche Informationen oder gestufte Hilfen eingebunden und die Repräsentationsformen bezüglich ihres fachdidaktischen Mehrwerts zur Vermeidung von Schülerfehlvorstellungen optimiert wurden. Angesichts der Instruktionsqualität war es zudem notwendig, die Aufgabenstellungen zur Förderung des Stoff-Teilchen-Konzeptverständnisses zu überarbeiten und gezielter in die einzelnen Lernpfade zu integrieren. Zur Beantwortung der Forschungsfragen FF3₁, FF4₁, FF5₁, FF6₁ und FF7₁ aus Kapitel 5.2 wurde das AR-Setting nach erfolgreich umgesetzten Optimierungen für die Vergleichsgruppen als non-AR-Lernumgebung (Simulation auf dem Tablet) umprogrammiert und zusätzlich auf die High-End-Technologie HMD-AR (AR-Brille) transferiert. Demnach sind im Zuge des Promotionsprojekts drei finale Lernumgebungen, zwei AR-Apps und eine Simulation, entstanden, welche im Folgenden näher beschrieben werden.

8.3.1 Überarbeitung der Technik und des UI

Um das Setting möglichst nutzerfreundlich zu gestalten, wurde die Farbgebung und Reihenfolge der Lernpfade angepasst. Demnach sollte mit Blick auf eine potentielle Rot-Grün-Sehschwäche der Lehrkräfte die Farbe *Grün* ersetzt werden. Die Wahl fiel auf ein dunkleres Blau, welches sich von der Farbe Rot abgrenzt (vgl. Abbildung 23). Obgleich die Reihenfolge der Lernpfade in Teil 2 *Nach Anschalten der Gleichspannungsquelle* noch immer beliebig gewählt werden kann, stellte sich heraus, dass sich die Probanden in der Vorstudie vorrangig chronologisch von oben nach unten arbeiteten. Aus diesem Grund wurden die Lernpfade *Elektrolyse auf Teilchenebene* und *Chemische Reaktionen* in ihrer Positionierung vertauscht (vgl. Abbildung 23). Mit Blick auf die weiteren Änderungen (s.u. Kapitel 8.3.2) und dem angestrebten Vergleich der Teilchenprozesse vor und nach Anschalten der Gleichspannungsquelle, sollte so die kognitive Verarbeitung besser unterstützt werden (vgl. Kohärenzprinzip nach Fiorella & Mayer, 2021). In Bezug auf die Grundsätze *Individualisierbarkeit* und *Erwartungskonformität* wird obendrein eine höhere Systemqualität erwartet.

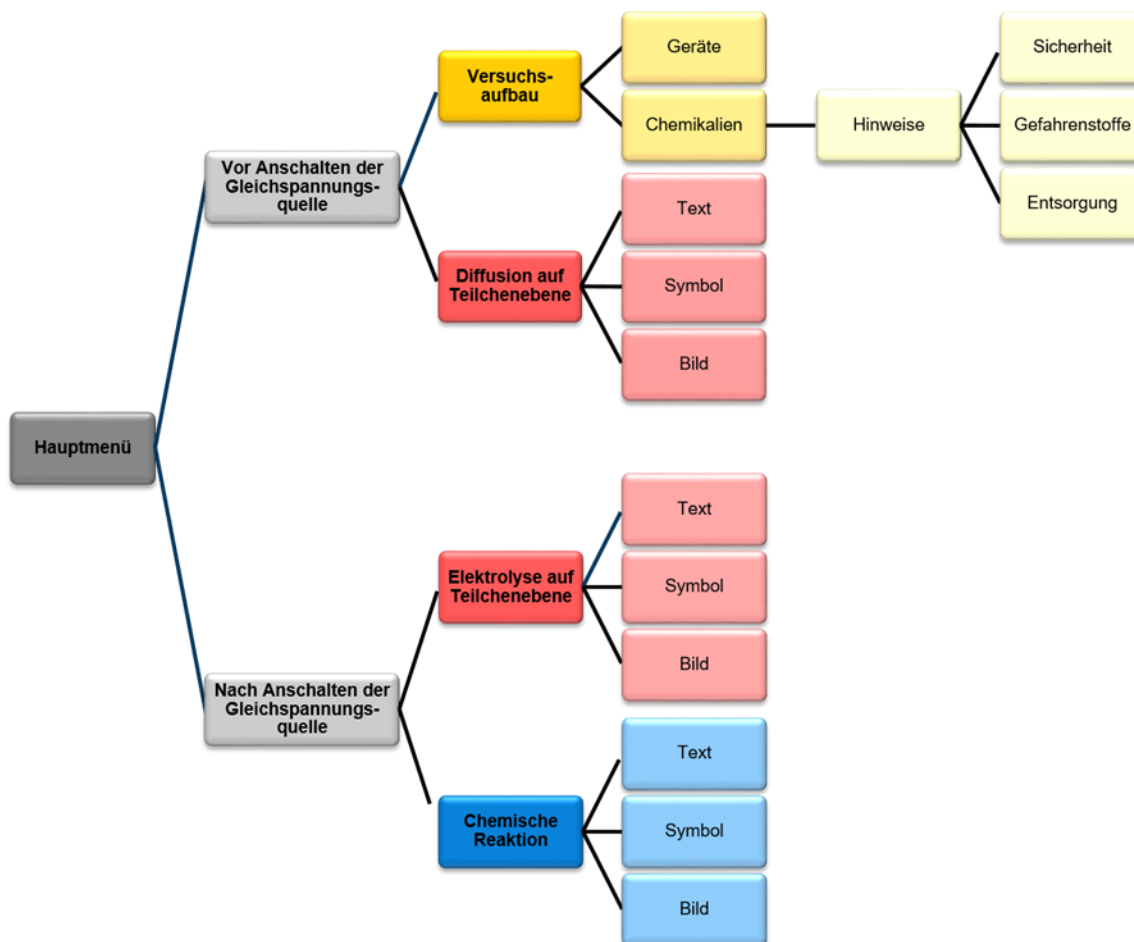


Abbildung 23. Übersicht der modifizierten Lernpfade mit Funktionenwahl.

Im Hinblick auf die Kriterien *Selbstbeschreibungsfähigkeit* und *Erwartungskonformität* (Prümper, 2008; Figl, 2010) wurde die Navigation und das Layout der Lernumgebung umgestaltet. Abbildung 24 zeigt, dass eine Hauptmenüleiste sowie eine gesonderte Funktionsleiste in den Lernpfaden integriert wurden, die den ästhetischen Aufmachungen gängiger Applikationen des Alltags (z.B. „Google Maps“) entsprechen. Der Funktionenbaum wurde jedoch nicht eliminiert. Auch wenn dieser nicht mehr länger als Steuerungselement fungiert, kann die Übersicht der Lernpfade in modifizierter Form (vgl. Abbildung 24) durch Klick auf den zugehörigen Button geöffnet und eingesehen werden. Das Hauptmenü links auf dem Display (vgl. Abbildung 24) listet alle Lernpfade auf und unterstützt bei der Bearbeitung der Themenblöcke mit Einblendungen kurzer Hinweise. Dabei kann es sich beispielsweise um Instruktionen oder Fragen zum handlungsorientierten Experimentieren handeln (z.B. Wann wird die Gleichspannungsquelle eingeschaltet?). Sobald ein Lernpfad angeklickt wurde (s. Abbildung 24), werden in derselben Menüansicht alle Optionen, inkl. einer Aufgabe (s.u. Kapitel 8.3.3), dargestellt. Die horizontale, farblich abgestimmte Funktionsleiste im Lernpfad liefert mit dem Info-Button zusätzliche Informationen und führt mit dem Übersicht-Button zum „Funktionenbaum“. Der Exercise-Button leitet zu weiterführenden Aufgaben über und der Home-Button bietet die Möglichkeit zum Start zurückzugehen (vgl. Abbildung 24).

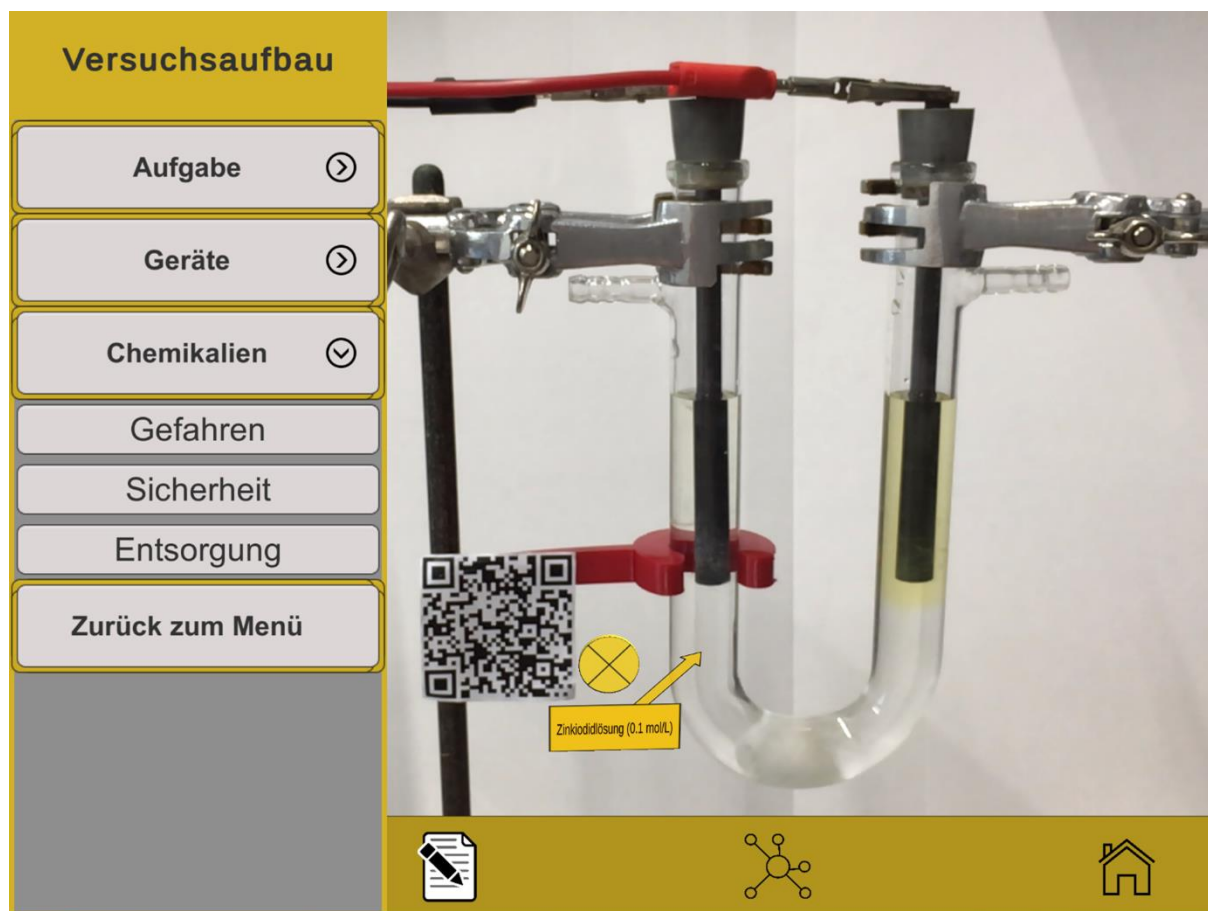


Abbildung 24. Sicht durch das Tablet mit der AR-Lernumgebung auf die reale Versuchsanordnung; Ausschnitt des Lernpfades Versuchsaufbau mit geöffnetem Menü und Funktionsleiste des Lernpfades.

Von grundlegender Bedeutung in der technischen Weiterentwicklung der AR-Lernumgebung war der Perspektivenwechsel bei der Sicht durch das Tablet auf die verschiedenen Seiten der Versuchsapparatur. Die Bewegungsfreiheit der Probanden war während der App-Testung in der Vorstudie sehr eingeschränkt (vgl. Kapitel 7.2.2). Das Tablet konnte in seiner Position nicht verändert werden. Angesichts der funktionalen Rahmenbedingungen war es folglich unerlässlich diesen Mangel im Setting zu beheben. Es erfolgte daher die Einbindung eines weiteren, zweiten Markers. Werden die Marker in Form von QR-Codes detektiert, können die AR-Inhalte in passenden Positionen aufgerufen werden. Es wurde ein Marker zwischen den Schenkeln des U-Rohrs befestigt, der nach erfolgreicher Detektion beseitigt werden konnte, um die Versuchsapparatur nicht zu verdecken. Ferner musste ein weiterer Marker angebracht werden, dessen Lage sich während der gesamten App-Nutzung in der Lernumgebung nicht verändern durfte. Mittels einer im 3D-Druck-Verfahren hergestellten Halterung konnte der Marker stabil an der Apparatur angebracht werden, ohne dabei wichtige Stellen des Versuchsaufbaus zu verdecken und den Elaborationsprozess zu stören (vgl. Abbildung 24). Der Marker selbst wurde in seinem Erscheinungsbild (Größe, Abbildung, Farbe) möglichst schlicht gehalten, um nicht vom Versuch abzulenken und dabei die kognitive Verarbeitung in Hinblick auf den Stoff-Teilchen-Ebenenwechsel negativ zu beeinflussen. Als notwendiges technisches Element ist er irrelevant für die Erreichung der intendierten Lernziele und sollte nach dem Kohärenzprinzip nach Fiorella und Mayer (2021) möglichst unscheinbar sein (vgl. Reinhold, 2019). Die technische Modifizierung der AR-Lernumgebung gestattet es den Nutzenden nun das Tablet zu drehen oder schwenken sowie kurze Zeit von der Apparatur wegzuwenden. Überdies können AR-Inhalte, insbesondere Teilchenprozesse, in Abhängigkeit von der Entfernung zwischen Tablet-Kamera und Versuchsapparatur vergrößert bzw. verkleinert werden. Die Lehrkräfte können die Repräsentationen auf diese Art und Weise selbstständig aus einer für sie zum Lerngegenstand passenden Perspektive betrachten (vgl. Schnotz, 2001, 2005). Dieser Repräsentationswechsel zwischen Text, Symbol und Bild sowie deren vernetzte Kombination sollte sich bereits positiv auf die Konstruktion interner Repräsentationen auswirken (vgl. Fiorella & Mayer, 2021; Schnotz, 2001). Können darüber hinaus die symbolischen und depiktionalen Teilchen mit dem Realobjekt aus verschiedenen Blickwinkeln betrachtet werden, sollten so kognitive Modellierungsprozesse initiiert werden, die die instruktional verwendeten Repräsentationen stärker mit den intendierten mentalen Modellen der Probanden in Einklang bringen (vgl. Reinhold, 2019; Schnotz & Bannert, 2003). Der erweiterte Bewegungsfreiraum sollte die Usability zum einen hinsichtlich des Kriteriums Lernförderlichkeit optimieren. Zum anderen sollten durch das selbstregulierte Arbeiten und den weiteren Möglichkeiten mit den virtuellen Objekten zu interagieren, die Kriterien *Steuerbarkeit*, *Erwartungskonformität* und *Individualisierbarkeit* ausgebaut worden sein.

8.3.2 Überarbeitung der fachdidaktischen Gestaltung

Mit Blick auf den perspektivischen Einsatz im Fachunterricht deckte die Pilotierung eine fachdidaktische Schwachstelle hinsichtlich der Teilchenmodellierung auf. Es könnte durch die mittels Symbole und Bilder dargestellten Ionen und Moleküle in den Lernpfaden zur Diffusion und Elektrolyse der Eindruck entstehen, die Teilchen befänden sich in der Flüssigkeit. Fehlvorstellungen zum Teilchenkonzept wie „die Ionen sind im Wasser“ wären dann die Folge und stören die Betrachtung der Teilchen im Diskontinuum (ISB, 2023b; Fladt, 1984; Johannesmeyer, 2004). Das AR-Setting stellt so eine Herausforderung dar, da es prinzipiell vermieden werden sollte, Teilchen in Gerätschaften wie dem U-Rohr zu visualisieren (vgl. ISB, 2023b). In diesem Zusammenhang wurde bereits in Kapitel 6.4.2 darauf hingewiesen, dass es sich bei der beschriebenen AR-Lernumgebung um eine vollkommen neue Methode der Teilchenmodellierung handelt. Der reale Versuchsaufbau demonstriert die Stoffebene, wohingegen die virtuellen AR-Repräsentationen die Teilchenebene darstellen. Um einen Split-Attention-Effekt (vgl. Ayres & Sweller, 2021) zu vermeiden, wurde sich bewusst für die Einbindung der Teilchenprozesse im U-Rohr entschieden. Jedoch scheint die Symbolisierung des Ebenenwechsels mithilfe des Tablets nicht ausreichend zu sein, um Kontinuums-Vorstellungen zu vermeiden.

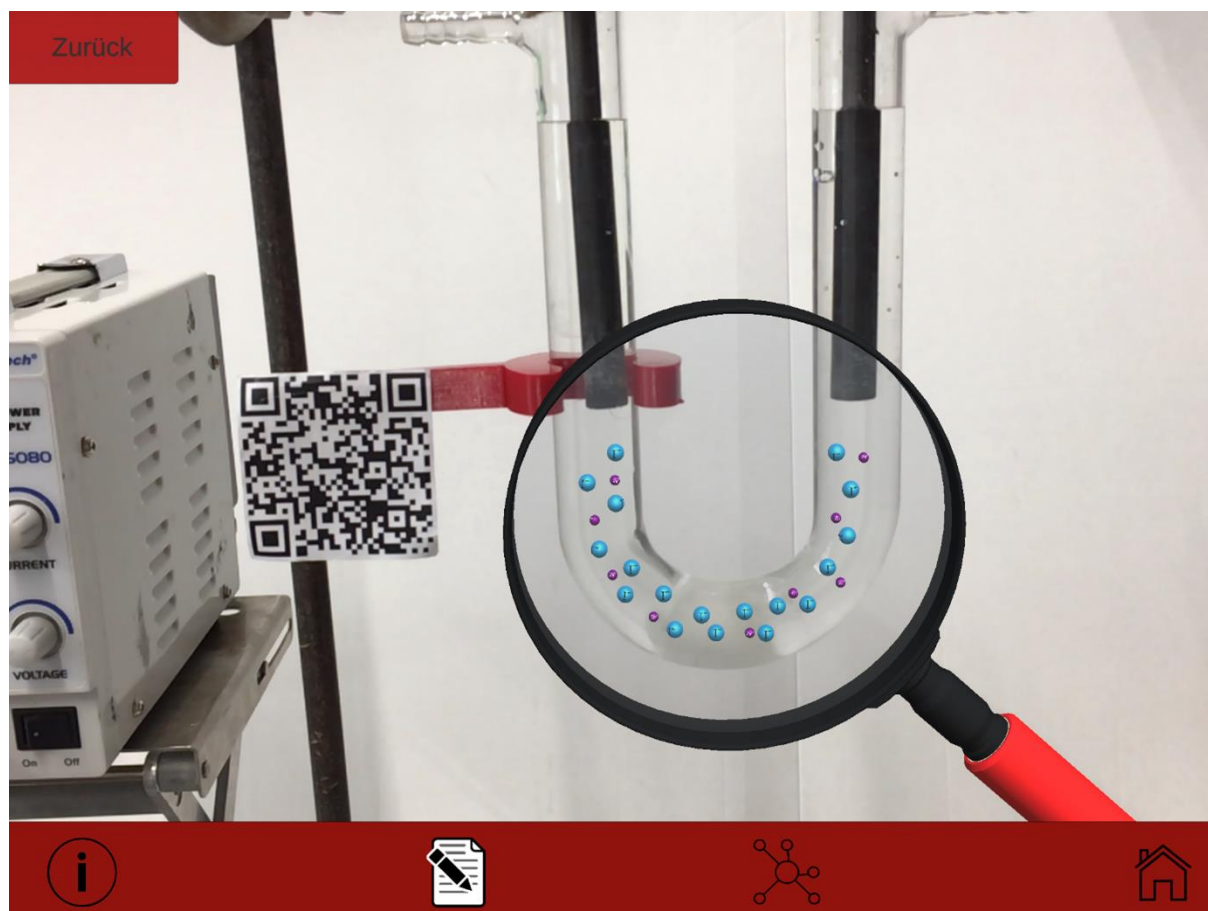


Abbildung 25. Ausschnitt aus dem Lernpfad Diffusion auf Teilchenebene (Bild) mit eingeblendeter Super-Lupe.

Schließlich wird mit Blick durch das Tablet der reale Versuchsaufbau auf dem Bildschirm direkt mit den AR-Objekten vermischt. Demnach wurde eine Super-Lupe in die AR-Lernumgebung integriert (vgl. ISB, 2023b), die die Trennung der Ebenen betonen soll (vgl. Abbildung 25). Die Super-Lupe erscheint automatisch nach erstmaligem Anklicken des Lernpfads zu den Teilchenprozessen. Der Nutzende ist so gezwungen sich gezielt mit dem Stoff-Teilchen-Ebenenwechsel auseinanderzusetzen und erhält zusätzlich Informationen zum Diskontinuumskonzept. Ferner wird angesichts der theoretischen Aspekte aus Kapitel 3.3 zum multimedialen Lernen nach Mayer (2014) darauf hingewiesen, dass es sich um eine Modellierung handelt, die zur besseren Übersicht die Wassermoleküle und ihre Hydratation vernachlässigt (vgl. Abbildung 25). Aus chemiedidaktischer Perspektive müsste die Lupe durchgängig sichtbar bleiben. Da die AR-Lernumgebung das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis von Lehrkräften fördern soll, wurde sie jedoch nach gewisser Zeit wieder ausgeblendet. Sie soll die Probanden lediglich an den Wechsel erinnern. Ihre beständige Sichtbarkeit würde Redundanz schaffen und die Versuchspersonen gegebenenfalls kognitiv unnötig belasten (vgl. Kalyuga & Sweller, 2014).



Abbildung 26. Ausschnitt des Lernpfads Diffusion nach Anklicken des Infokastens.

Abbildung 26 zeigt am Beispiel des Lernpfads Diffusion auf, dass zusätzliche Hilfen in die Lernumgebung implementiert wurden, die je nach Bedarf ein- und ausgeblendet werden können. Vorrangig handelt es sich hierbei um Hinweise zur Modellierung. Dabei wird beispielsweise die Hydratation erklärt und orientiert an der ausgewählten Repräsentationsform veranschaulicht (vgl. Abbildung 26). Durch Anklicken des Info-Buttons links unten in der Funktionsleiste (vgl. Abbildung 26) können weitere Informationen abgerufen werden. Diese beinhalten Erklärungen zur makroskopischen, submikroskopischen und repräsentativen Ebene sowie ihren Übersetzungen und Verknüpfungen. Der Modellcharakter der AR-Objekte musste insbesondere bei den Prozessen auf Teilchenebene visuell stärker hervorgehoben werden. Um Fehlvorstellungen zum Teilchenmodell zu vermeiden, wurden für die Teilchen in der finalen App-Version Farben gewählt, die keinerlei Bezug zur Realität hatten (vgl. Barke, 2006). Da die Zinkabscheidung in Form eines grauen Baumes an der Kathode und die Iodbildung in Form von gelben Schlieren an der Anode sichtbar werden, wurden diese Kolorierungen geändert (vgl. ISB, 2023b). Es sollte nicht der Eindruck entstehen, die Farben der Teilchen entsprächen den Stoffen. In der Pilotstudie stützte sich die Wahl der Farben auf dem Kohärenzprinzip (vgl. Fiorella & Mayer, 2021). Dies musste jedoch rückblickend aus fachdidaktischen Gründen verworfen werden.



Abbildung 27. Ausschnitt des Lernpfads Elektrolyse auf Teilchenebene (Bild) mit Teilchenbewegungen bei Reaktionsablauf und Button zur Geschwindigkeitsregulation.

Demnach fiel die Wahl auf die Farben Magenta, Lila, Hell- und Dunkelblau (vgl. Scheiter & Eitel, 2015; s. Abbildung 27). Dabei wurde erneut darauf geachtet, dass auch Lehrkräfte mit einer Rot-Grün-Sehschwäche die unterschiedlichen Farbgebungen wahrnehmen können (vgl. Individualisierbarkeit laut Prümper, 2008). Ferner wurden interaktive Geschwindigkeitssteuerungen in den Lernpfaden zur Elektrolyse auf Teilchenebene integriert, sodass die Lernumgebung stärker mit der realen Versuchsdurchführung verknüpft wird. Indem die Spannungen real und virtuell erhöht bzw. verringert werden können, soll, bezogen auf die Teilchenbewegungen, ein tieferes Verständnis aufgebaut werden (vgl. Abbildung 27). Auch mit dieser funktionalen Erweiterung zur Regulation der Teilchengeschwindigkeit soll das selbstregulierte Lernen gefördert werden (vgl. Bannert, 2009; Pedaste et al., 2012). Insgesamt stützt sich Implementation auf den Grundsätzen der Lernförderlichkeit und Steuerbarkeit nach Isonorm ISO 9241/110 (2020; vgl. Prümper, 2008). Zusätzlich wurde der Lernpfad *Chemische Reaktion* um eine weitere Funktion, die Verknüpfung mit dem zugehörigen repräsentativen Lernpfad zur Elektrolyse, erweitert. Die Probanden erhalten damit die Option, neben den Ein- und Ausblendungen der chemischen Reaktionen, die Teilchenprozesse im U-Rohr parallel betrachten zu können (vgl. Abbildung 28).

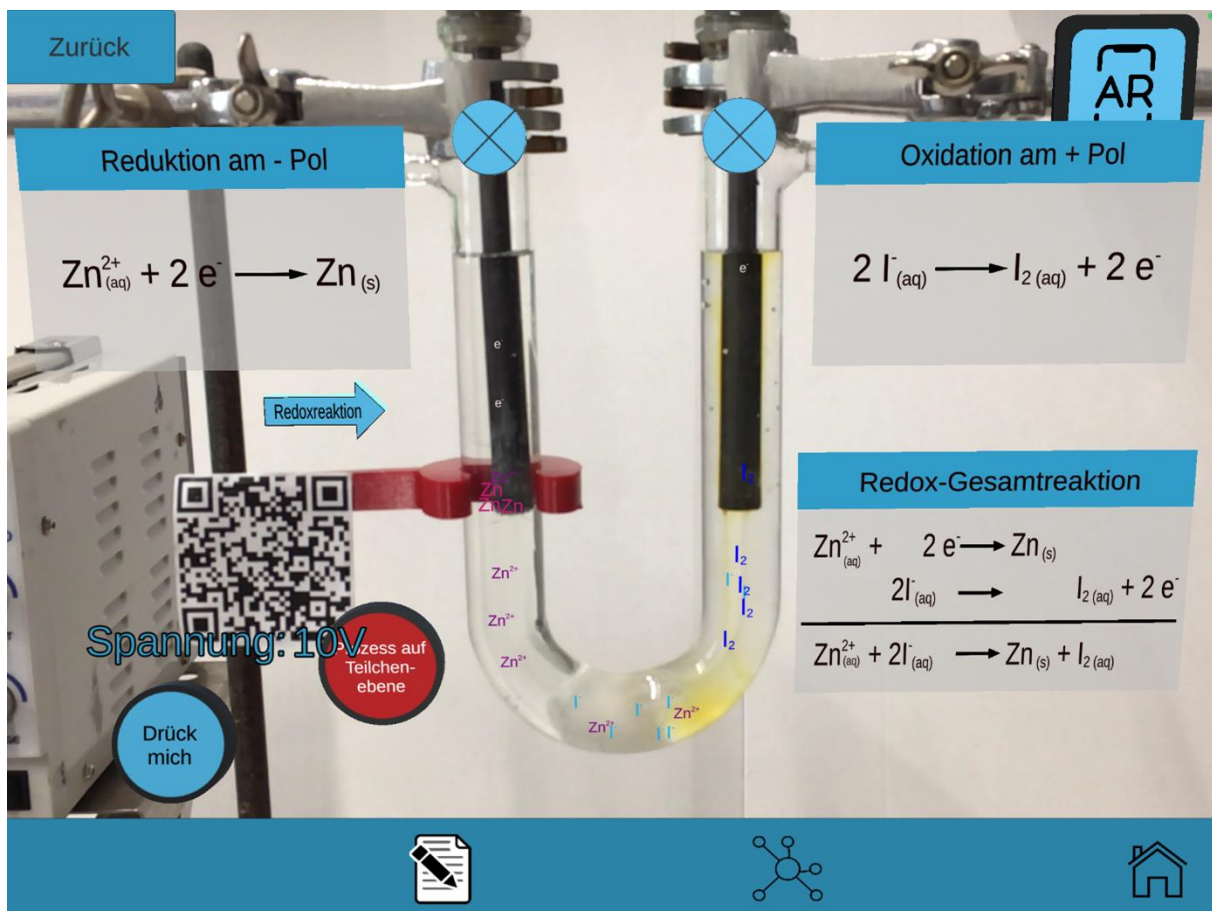


Abbildung 28. Ausschnitt des Lernpfads Chemische Reaktion (Symbol) nach Anklicken aller Teil- und Gesamtgleichungen mit eingblendeten Teilchenprozessen.

Ferner wurden, im Gegensatz zur AR-Lernumgebung der Vorstudie (s. Kapitel 6.4), die dreidimensionalen, depiktionalen Repräsentationsformen der Teilchenprozesse auch in den Kästen zur Beschreibung der chemischen Reaktionen adaptiert. Dieses Vorgehen soll für mehr Kohärenz sorgen (vgl. Fiorella & Mayer, 2021).

8.3.3 Überarbeitung der Instruktionen

Um das Treatment für die Versuchsgruppen möglichst lernwirksam zu gestalten, folgte die Aufgabenentwicklung der AR-Lernumgebung gemäß instruktionspsychologischen Prinzipien (vgl. Reinhold, 2019). Mit Blick auf die Theorie des multimedialen Lernens (Schnotz, 2001; Mayer, 2014) wurden geschlossene Problemlöseaufgaben integriert, deren Ziele klar formuliert und für die Lehrkräfte ersichtlich sind (Reinhold, 2019; vgl. Kapitel 7.2.2). Um die Probanden kognitiv zu aktivieren und einen kumulativen Wissensaufbau bezogen auf den Stoff-Teilchen-Ebenenwechsel zu ermöglichen, wurden zwei Aufgabenformate integriert. Jeder der vier Lernpfade enthält einen *Aufgabe*-Button, der vor Beginn der Lernpfadelaboration anzuklicken ist. Dabei wird die Versuchsperson aufgefordert ihre Erwartungen an die jeweilige Phase bezogen auf den realen Versuchsablauf (z.B. erwartete Beobachtungen nach Reaktionsbeginn auf Stoffebene oder erwartete Teilchenprozesse vor Reaktionsbeginn) zu nennen. Unabhängig von den in der Lernumgebung dargebotenen AR-Informationen soll die Versuchsperson anfänglich ihre eigenen Gedankengänge zur Stoff- und Teilchenebene äußern. Anschließend wird die Versuchsperson instruiert den zugehörigen Lernpfad mit allen realen und virtuellen Inhalten zu elaborieren. Je nach Belieben können sämtliche Hilfen und Informationen angeklickt werden. Sobald sich die Versuchsperson durch den gesamten Lernpfad gearbeitet hat, folgen die Abschlussaufgaben (vgl. Abbildung 29). Unter Zuhilfenahme der realen und virtuellen Objekte sollen Erklärungen, Beschreibungen und Reflexionen zu Stoff- und Teilchenebene sowie den genutzten (M)ER getätigt werden. Mit dem Ziel den Umfang und die Art der geforderten Aufgabenleistung zu verdeutlichen, wurde bei der Formulierung auf Operatoren geachtet (vgl. Kauertz, 2014). Im Vergleich zur ersten Aufgabe, sollen die Versuchspersonen angehalten werden, sich mit ihrem Lernzuwachs auseinanderzusetzen. Die von ihnen einst getätigten Aussagen zu den erwarteten Prozessen schweifen gegebenenfalls von den AR-repräsentierten Inhalten ab. Die Versuchsperson ist einem Reflexionsprozess ausgesetzt und wird gezwungen, sich intensiv mit den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) zu beschäftigen und ihren Elaborationsprozess dabei zu reflektieren. Neben dem Stoff-Teilchen-Ebenenwechsel werden Gedankengänge zum Umgang mit der chemischen Fachsprache sowie zum (einst nicht) vorhandenen Fachwissen erwartet. Ist die Versuchsperson der Auffassung, die Fragen seien beantwortet, so kann die Beendigung mit einer Anklick-Funktion durch Haken-setzen festgehalten werden (vgl. Abbildung 29). Wurden alle Haken gesetzt, ist der aktuelle Lernpfad abgeschlossen und die Lernumgebung verweist auf den Nächsten. Um eine tiefgehende Ela-

boration auf allen drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) zu ermöglichen, fordert die Lernumgebung die Lehrkraft auf durchweg laut zu Denken (vgl. Kapitel 11.4.3). In Hinblick auf die Experimentellen Designs der Hauptstudie 2 (s. Kapitel 11.2) wird damit ein einheitliches Vorgehen während der gesamten Datenerhebung gewährleistet.

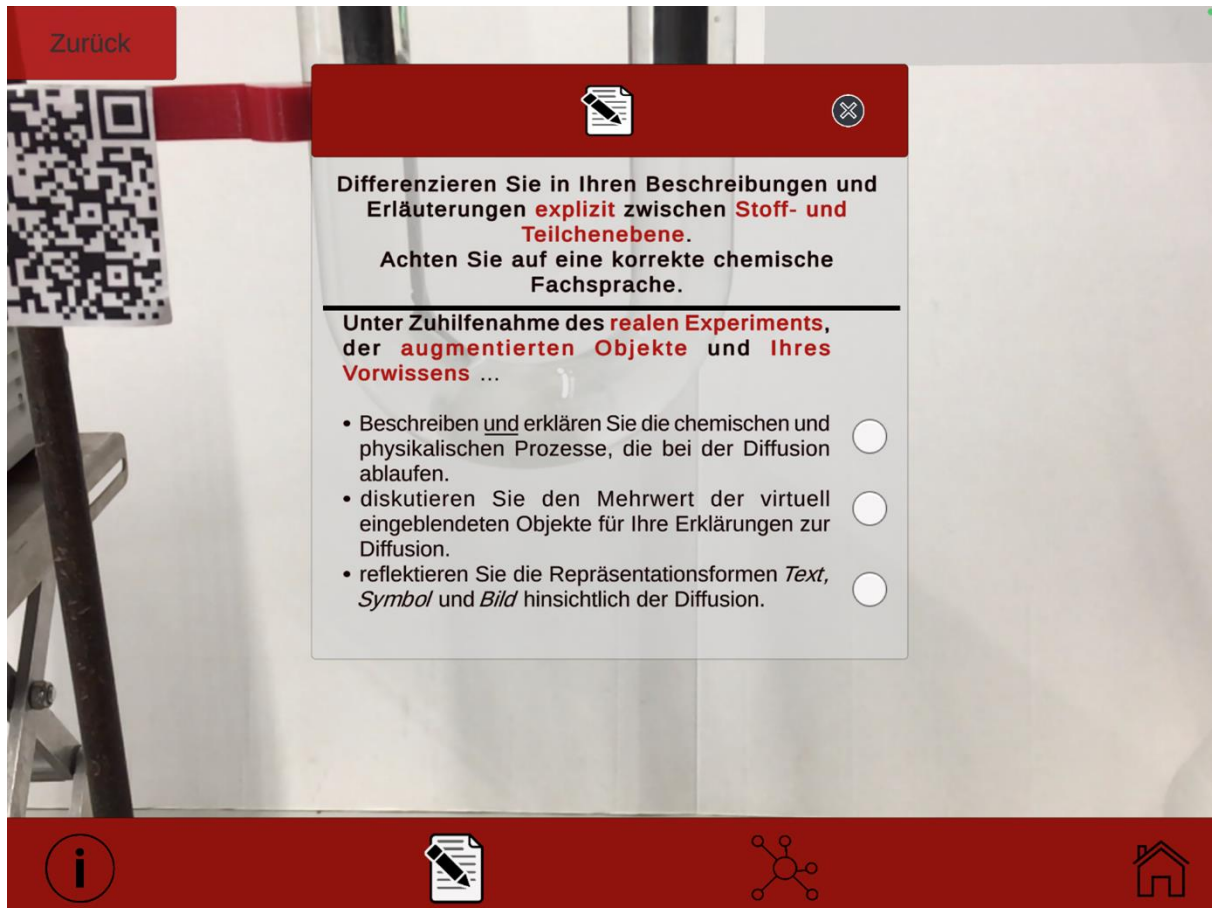


Abbildung 29. Abschlussaufgaben des Lernpfads zur Diffusion auf Teilchenebene.

8.3.4 Lernumgebungen für die Vergleichsgruppen

Nachdem alle technischen und inhaltlichen Optimierungen vorgenommen wurden, erfolgte der Übertrag des AR-Settings auf zwei weitere Lernumgebungen. Dabei schloss sich ein inhaltsgleicher Transfer an, indem eine Simulation für das Medium *Tablet* und eine AR-Variante für das Medium *AR-Brille* entwickelt wurden. Die Abbildungen 30 und 31 demonstrieren exemplarisch am Beispiel des Lernpfads Elektrolyse auf Teilchenebene, dass die Stoffebene im AR-Setting stets mit den AR-Objekten verknüpft ist. Im Vergleich dazu sollte die Simulation aus kognitionspsychologischer Sicht weniger positive Effekte hervorrufen, da der Bildschirm des Tablets lediglich die Teilchenebene visualisiert und die reale Stoffebene (z.B. Abscheidung von Zink an der Anode und Bildung von Iodsclieren an der Kathode) außer Acht lässt (vgl. Fiorella & Mayer, 2021). Dies wird deutlich an den stofflichen Veränderungen, die sich in den

terschiedlichen Lernanwendungen arbeiteten (vgl. Kapitel 8.2 und 8.3.4), erhielten die Probanden passgenaue Erhebungsinstrumente. Dabei wurde an den Skalenmerkmalen samt Iteminhalten, nichts geändert, sondern nur Umformulierungen beispielsweise von „AR-Setting“ in „simulationsbasiertes Setting“ getätigt. Diese marginalen Veränderungen sollten keinen Einfluss auf die Testgüte der Erhebungsinstrumente haben.

8.5 Durchführung von Hauptstudie 1

Im Zeitraum von Dezember 2021 bis September 2022 wurde die Datenerhebung in den Fachdidaktik-Laboren der Technischen Universität München oder der jeweiligen Schule bzw. Institution der teilnehmenden Lehrkräfte durchgeführt. Wie in Abbildung 32 dargestellt verlief die Untersuchung in fünf Etappen. Entsprechend des Forschungsdesigns aus Kapitel 8.2 fand zu Beginn eine digitale Vorbefragung statt, um die Einstellungen und Selbstwirksamkeitserwartungen hinsichtlich digitaler Medien und AR der Lehrkräfte zu erfassen. Zusätzlich zu den Erläuterungen zur Studiendurchführung auf den ersten Seiten des digitalen Fragebogens wurden die Probanden über den Zweck der Studie unterrichtet. Die digitale Vorbefragung sollte überdies personenbezogene und demografische Begleitdaten (Alter, Fachbereich, Tätigkeit, Berufserfahrung, abgeschlossener Studienabschluss, Erfahrungen mit AR usw.) erheben. Das Ausfüllen des Fragebogens dauerte ca. 30 Minuten. Dabei konnten Zeit und Ort individuell von den Lehrkräften ($N = 157$) gewählt werden. Wichtig war es, dass die Befragung vor der Testung der Lernumgebung in einer weitgehend ruhigen Atmosphäre stattfand. Anschließend folgten unter Beachtung der jeweils geltenden Corona-Maßnahmen die individuell vereinbarten Präsenztreffen, um die Lernumgebungen zu testen und sich der digitalen Abschlussbefragung zu unterziehen ($N = 122$). Aus der Gesamtstichprobe bearbeiteten 60 Chemielehrkräfte zwischen der Vor- bzw. Abschlussbefragung die Lernumgebung mit einem Prä- bzw. Posttest zur Erfassung des Stoff-Teilchen-Konzeptverständnisses und des Umgangs mit (M)ER (vgl. Abbildung 32 ausgegraute Etappen). Für nähere Informationen zu diesen beiden Etappen der Datenerhebung sei auf Hauptstudie 2 in Kapitel 11.5 verwiesen. Zu guter Letzt schloss sich mit allen Probanden, die eine der drei Lernumgebungen elaboriert hatten, die Erhebung der Akzeptanz und Usability an ($N = 122$). Hierfür wurde eine digitale Abschlussbefragung durchgeführt, die überwiegend an dem jeweiligen Präsenzort stattfand, jedoch auch von Zuhause aus erfolgen konnte.

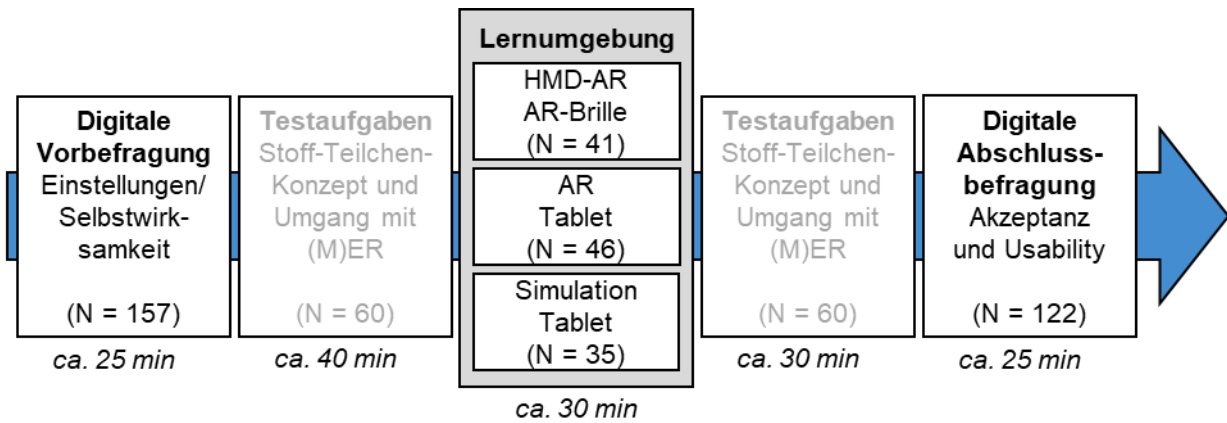


Abbildung 31. Durchführung und Ablauf der Datenerhebung mit Fokus auf Hauptstudie 1: Erfassung der Personenmerkmale und Erfassung der Akzeptanz und Usability sowie Bearbeitung einer der drei Lernumgebungen.

Die Präsenztreffen für die Datenerhebungen wurden teilweise mit Lehrerfortbildungen zur Gestaltung von AR-Lernumgebungen für den Chemieunterricht verbunden. Um unerwünschte Nebeneffekte im Hinblick auf die Vorerfahrungen mit AR zu vermeiden, wurde darauf geachtet, dass die Fortbildung erst nach abgeschlossener Untersuchungsdurchführung erfolgte.

8.6 Statistische Analysemethoden

8.6.1 Test auf Normalverteilung

Für die Entscheidung, ob parametrische oder nichtparametrische Tests anzuwenden sind, ist eine Prüfung der Datenverteilung erforderlich. Bei parametrischen Testverfahren muss das Kriterium der Normalverteilung erfüllt sein (Bortz & Schuster, 2010). Dies gilt zum Beispiel für die Durchführung statistischer Testverfahren wie dem F -Test (s.u. Abschnitt Regressionsanalysen und einfaktorielle Varianzanalyse). Sind die numerischen Daten in symmetrischer Form verteilt, sodass Median, Modus und Mittelwert identisch sind, liegt eine Normalverteilung vor. Der Kolmogorov-Smirnov-Test kann hierfür zur Überprüfung in SPSS herangezogen werden (Tiemann & Körbs, 2014). Kann die Normalverteilung rechnerisch nicht nachgewiesen werden, erlaubt jedoch das zentrale Grenzwerttheorem der Statistik eine Prämissenverletzung. Dieses besagt, dass Mittelwertverteilungen aus Stichproben mit gleichem Umfang (n), die aus derselben Population stammen, in eine Normalverteilung münden. Wenn es sich um Mittelwerte von hinreichend großen Stichproben ($n \geq 30$) handelt, verteilen sich diese normal um den Mittelwert der Grundgesamtheit (Bortz & Schuster, 2010; Kuckartz et al., 2013). Folglich sind mit ansteigender Zahl an Beobachtungen K Signifikanztests unabhängig von der Verteilung gültig und F -Tests halten mit $K > 30$ das festgelegte Signifikanzniveau sogar bei nicht normalverteilten Störgrößen ein (Backhaus et al., 2011; Bortz & Schuster, 2010).

8.6.2 Reliabilitätsanalyse

Um die Güte der Haupt- und Subskalen zu den Personenmerkmalen hinsichtlich digitaler Medien und AR (n Itemanzahl, vierstufige Likert-Skala 0: „trifft gar nicht zu“ bis 3: „trifft voll zu“) zu bestimmen, wurde vorrangig der Alpha-Koeffizient nach Cronbach genutzt (vgl. Bortz &

Döring, 2016). Es gilt anzumerken, dass für die Reliabilitätsanalyse der Subskala *Selbstwirksamkeit (dig) TK (SW-TK)* einmalig auf den Spearman-Brown-Koeffizienten r' (s. Tabelle 26) zurückgegriffen wurde. Die Wahl begründet sich durch die geringe Anzahl an Items ($n = 2$) aus denen sich die Skala zusammensetzt (vgl. Kapitel 6.5.3, Eisinga et al., 2013).

8.6.3 Korrelationsanalyse

Mit Blick auf die in Kapitel 8.2 angeführten (unabhängigen und abhängigen) Variablen kann mittels Korrelationsanalysen untersucht werden, ob diese wechselwirkend in Beziehung stehen. Die Höhe des Zusammenhangs zweier Variablen wird durch die Berechnung der Kovarianz, als wechselseitige Varianz, angegeben. Anschließend erfolgt die Normierung zur Produkt-Moment-Korrelation. Die Enge des linearen Zusammenhangs zweier Merkmale x und y kann durch die Berechnung des Korrelationskoeffizienten r bestimmt werden (Bortz & Schuster, 2010). Die Angabe von r erfolgt mittels Division der Kovarianz der Variablen x und y durch das Produkt deren Standardabweichungen s_x und s_y :

$$r = \frac{cov(x, y)}{s_x \cdot s_y}$$

Gängig ist die Angabe des Korrelationskoeffizienten „Pearson r “. Der Rangkorrelationskoeffizient „Rho“ nach Spearman (r_s) gibt den Zusammenhang zweier ordinalskalierten Merkmale an (Bortz & Döring, 2002). Die Werte des Korrelationskoeffizienten liegen zwischen -1 und $+1$ und können, unabhängig von dem Vorzeichen, die Stärke des Zusammenhangs demonstrieren (vgl. Tabelle 24).

Tabelle 24. Höhe von r (und r_s) zur Angabe der Zusammenhangsstärke nach Kuckartz et al. (2013).

Betrag von r	Stärke des Zusammenhangs
$.00 \leq r < .10$	kein Zusammenhang
$.10 \leq r < .30$	Zusammenhang
$.30 \leq r < .50$	mittlerer Zusammenhang
$.50 \leq r < .70$	hoher Zusammenhang
$.70 \leq r < 1.00$	sehr hoher Zusammenhang

Nachdem die Produkt-Moment-Korrelation nach Pearson bei intervallskalierten Variablen Anwendung findet, wird die Korrelationsanalyse nach Spearman bei mindestens einer ordinalskalierten Variable genutzt (vgl. Kuckartz et al., 2013). Wohingegen sich Pearson lediglich bei linearen Zusammenhängen eignet, kann der Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman für Berechnungen beliebiger Zusammenhänge zweier Variablen angewandt werden (vgl. Kuckartz et al., 2013). Letzterer berücksichtigt die Rangreihenfolge der Werte und nicht deren Höhe. Folglich ist er robust gegenüber Ausreißern (vgl. Kuckartz et al., 2013). Da in der vorliegenden Studie die Variable *Einstellungen hinsichtlich AR* einen starken Ausreißer aufzeigt

und daher die Linearität nicht durchgehend sichergestellt werden kann, erfolgt die Korrelationsanalyse nach Spearman. Es wurden Korrelationsanalysen mit 2-seitiger Signifikanzprüfung für alle in Kapitel 8.4 beschriebenen Personen- und Usability-Merkmale durchgeführt.

8.6.4 Regressionsanalyse

Um die offen gestellten Forschungsfragen FF5₁, FF6₁ und FF7₁ aus Kapitel 5.2 beantworten zu können, schlossen sich mehrere schrittweise Regressionsanalysen an (vgl. Kapitel 9.3), die sich auf die gesamte Stichprobe beziehen. Nachdem für diese Forschungsfragen keine Hypothesen formuliert wurden, handelte es sich bei dem Verfahren ebenfalls um ein exploratives Vorgehen. Da bivariate Korrelationen als Koinzidenzen interpretiert werden können und keine hinreichende Voraussetzung für kausale Abhängigkeiten sind, soll mithilfe (schrittweiser) Regressionsanalysen der Einfluss der personenbezogenen Merkmale bzw. der Merkmale der Lernumgebung auf die Akzeptanz erfasst werden. Entsprechend werden die Zusammenhänge und Wirkungen systematisch und objektiv identifiziert. Die lineare Regression wird verwendet, um einen kausal angenommenen Zusammenhang zwischen zwei Merkmalen genauer zu analysieren. Dabei wird die Ursache als Prädiktor und die Wirkung als Kriterium angesehen (Bortz & Schuster, 2010). Die einfache Regression gibt demzufolge Aufschluss über die Wirkung einer Prädiktorvariable auf die Kriteriumsvariable. Wird eine weitere Prädiktorvariable in das Modell aufgenommen, so handelt es sich um eine multiple Regressionsanalyse (Backhaus et al., 2011). Das zu untersuchende Regressionsmodell kann durch selbstständige Vorüberlegungen des Forschers konstruiert werden. Auf Basis herausragender Ergebnisse der Korrelationsanalyse, können vermutete Ursache-Wirkungs-Beziehungen in ein Regressionsmodell eingebunden und analysiert werden (vgl. Backhaus et al., 2011). Die Übereinstimmung der vorhergesagten Werte mit den beobachteten, realen Werten lässt sich mithilfe des Bestimmtheitsmaßes R^2 abschätzen. R^2 misst demzufolge die Güte der Anpassung der Regressionsfunktion an den empirischen Daten (Backhaus et al., 2011). Dabei kommt den Residualgrößen eine grundlegende Rolle zu, da sie die Differenzen der beobachteten Häufigkeiten mit den erwarteten Häufigkeiten beschreiben (Kuckartz et al., 2013). Die Berechnung erfolgt durch die Relation *Varianz der Vorhersage* $s_{\hat{y}}^2$ zu *Varianz der Beobachtung* s_y^2 (vgl. Kuckartz et al., 2013):

$$R^2 = \frac{s_{\hat{y}}^2}{s_y^2}$$

Mit Werten zwischen 0 und 1 gibt das Bestimmtheitsmaß R^2 als Maß für die Güte einer Vorhersage an, wie viel Varianz durch das Regressionsmodell „erklärt“ werden kann (Backhaus et al., 2011). Bei Werten für das Bestimmtheitsmaß R^2 ab .02 liegt ein kleiner, ab .13 ein mittlerer und ab .26 ein hoher Effekt vor (vgl. Döring & Bortz, 2016, S.821). Dabei sollte berücksichtigt werden, dass das Bestimmtheitsmaß R^2 mit der Anzahl der unabhängigen Variablen

steigt. Soll die Güte der Vorhersage einer Grundgesamtheit geschätzt werden, so muss in der multiplen Regressionsanalyse mit dem korrigierten Bestimmtheitsmaß $R^2_{\text{kor.}}$ gerechnet werden. Dieses lässt sich mithilfe des nachstehenden Korrekturverfahrens und folglich der Einbindung des Bestimmtheitsmaßes R^2 , der Fallanzahl n und der Prädiktoren p ermitteln (Kuckartz et al., 2013):

$$R^2_{\text{kor.}} = 1 - \frac{n - 1}{n - p - 1} \cdot (1 - R^2)$$

Um eine Aussage über die Gültigkeit des geschätzten Regressionsmodells für die Grundgesamtheit zu treffen, wird als Prüfkriterium die F -Statistik angewandt (Backhaus et al., 2011). Als Nullhypothese dient hierfür die Aussage, dass kein kausaler Zusammenhang zwischen der abhängigen und den unabhängigen Variablen besteht. Zuerst wird ein empirischer F -Wert ermittelt. Dieser setzt sich aus dem Verhältnis der erklärten und nicht erklärten Streuung, jeweils dividiert durch ihre Freiheitsgrade, zusammen. Mit einer Vertrauenswahrscheinlichkeit des F -Tests von 95 % wird der empirische F -Wert anschließend mit einem theoretischen F -Wert verglichen. Ist der empirische F -Wert größer als der theoretische F -Wert, so kann die Nullhypothese verworfen und der kausale Zusammenhang als signifikant angesehen werden. Bei der schrittweisen (engl. *stepwise*) Regressionsanalyse werden die Prädiktoren in unterschiedlicher Reihenfolge, einzeln nacheinander, berücksichtigt (Backhaus et al., 2011). Das Analyseprogramm SPSS wählt die unabhängigen Variablen algorithmisch aus. Ziel dabei ist es ein möglichst gutes Modell mit einem hohen Bestimmtheitsmaß R^2 zu erreichen. Gütekriterium für die Einbindung oder Elimination einer unabhängigen Variablen in das Modell ist der F -Wert, der mittels schrittweiser Regressionsanalyse maximiert werden soll (Backhaus et al., 2011; Kuckartz et al., 2013).

Die Durchführung einer Regressionsanalyse erfordert gewisse Voraussetzungen (Backhaus et al., 2011; Kuckartz et al., 2013): Als erste Voraussetzung wird die Linearität in den Parametern angegeben. Diese kann mittels Punktediagramm schnell geprüft werden. Als weitere Prämisse soll vermieden werden, dass die Residuen in der Grundgesamtheit korrelieren. Ist dies der Fall, so handelt es sich um eine Autokorrelation. Dies wiederum kann zu Verzerrungen bei der Bestimmung der Konfidenzintervalle für die Regressionskoeffizienten führen. Indem die Residuen gegen die geschätzten Werte von Y geplottet werden, kann eine Autokorrelation graphisch diagnostiziert werden. Durch Ausgabe des Streudiagramms in SPSS kann getestet werden, ob die Störgrößen unabhängig voneinander sind. Die Inspektion der Residuen mittels Streudiagramm ermöglicht es zudem die Störgrößen auf Heteroskedastizität zu prüfen, da das lineare Regressionsmodell auf Homoskedastizität der Störgrößen fußt. Das bedeutet, dass die Varianz der Residuen unabhängig von den x -Werten ist und die Streuung der Punkte um eine Regressionsgerade homogen ist. Überdies ist die Prämisse der Vollständigkeit des Modells zu

prüfen. Ist es technisch unmöglich oder zu aufwendig alle relevanten Variablen in das Regressionsmodell einzubinden, so kann sich eine Verzerrung der Schätzwerte anschließen. Insofern jedoch keine Korrelation zwischen den im Modell eingeschlossenen erklärenden Variablen und der Störgröße (der unberücksichtigten Variablen) vorliegt, kann die Prämisenverletzung als konstanter Messfehler angesehen werden. Als weitere Voraussetzung wird die Multikollinearität genannt. Die Regressoren sollten dabei linear unabhängig sein. Die Korrelationsmatrix gibt hierfür einen ersten Einblick. Liegen die Korrelationskoeffizienten nahe 1 zwischen zwei unabhängigen Variablen, so scheint die Multikollinearität ernsthaft. Anschließend kann für die tiefergehende Diagnose eine Regression von jeder unabhängigen Variable X_j auf die restlichen unabhängigen Variablen durchgeführt und das zugehörige Bestimmtheitsmaß R_j^2 ermittelt werden. Als Maß für die Kollinearität dient sodann der *Variance Inflation Faktor* (VIF_j), der bei Werten < 10 Kollinearität ausschließt (Field, 2018):

$$VIF_j = \frac{1}{1 - R_j^2}$$

Sind alle oben angeführten Annahmen erfüllt, so kann angenommen werden, dass der Kleinstquadrateschätzer der beste lineare und unverzerrte bzw. erwartungstreue Schätzer für das Regressionsmodell ist (Backhaus et al., 2011). Mit Blick auf die Durchführung statistischer Tests wie dem F -Test wird nochmals auf die Normalverteilung der Daten und deren mögliche Prämisenverletzung bei hinreichend großen Stichproben verwiesen (vgl. Kapitel 8.6.1; zentrales Grenzwerttheorem der Statistik). Für die vorliegende Arbeit wurden alle Prämisen geprüft. Kleineren Prämisenverletzungen steht die Regressionsanalyse weitgehend unempfindlich gegenüber (Backhaus et al., 2011).

8.6.5 Mediatoreffekte

Zusammenhangsmodelle werden komplexer, wenn neben den direkten auch indirekte Einflüsse in Form von Mediatorvariablen vorliegen (Baron & Kenny, 1986). Ein Mediatoreffekt liegt vor, wenn die folgenden vier Kriterien erfüllt sind: 1) Die Prädiktorvariable beeinflusst signifikant die Kriteriumsvariable, 2) Die Prädiktorvariable wirkt sich signifikant auf den erwarteten Mediator aus, 3) Der Mediator wirkt sich, unter Kontrolle des direkten Einflusses von Prädiktor auf Kriteriumsvariable, signifikant auf die Kriteriumsvariable aus und 4) Sind alle drei Bedingungen erfüllt, so sollte sich zu guter Letzt der Effekt des Prädiktors auf das Kriterium verringern oder komplett zurückgehen. Hat die Prädiktorvariable keinen signifikanten Einfluss mehr auf die Kriteriumsvariable, so spricht man von einem totalen Mediatoreffekt (Baron & Kenny, 1986).

Zur Bestimmung des Mediatoreffekts wird in einem ersten Schritt die bivariate Korrelation zwischen unabhängiger und abhängiger Variable verifiziert. Es handelt sich dabei um den totalen Effekt. In einem zweiten Schritt schließt sich die Wirkungsanalyse der unabhängigen Variable

auf den Mediator an. Zu guter Letzt wird im dritten Schritt eine multivariate Regressionsanalyse durchgeführt, um die direkten Effekte zwischen unabhängiger Variable und Mediatorvariable sowie zwischen Mediatorvariable und abhängiger Variable zu ermitteln. Verliert die Prädiktorvariable auf die Kriteriumsvariable an Signifikanz, liegt ein direkter Effekt vor. Laut Baron und Kenny (1986) kann der totale Effekt als die Summe dieses direkten Effekts und dem indirekten Mediatoreffekt angesehen werden. Um die Mediatoreffekte prüfen zu können, müssen die Regressionskoeffizienten der drei direkten Effekte (vgl. Schritt 1 bis 3) mit ihren zugehörigen Standardfehlern ermittelt werden. Mittels Sobeltest kann sodann abschließend die statistische Signifikanz des indirekten Effekts berechnet werden (vgl. Glowinski, 2007). Er gibt zudem den Standardfehler des indirekten Effekts an, sodass ein t-Test durchgeführt werden kann (vgl. Glowinski, 2007; Urban & Mayerl, 2011).

8.6.6 Varianzanalytische Verfahren

Es sollte anschließend untersucht werden, welche Auswirkung die unabhängige Variable *Lernsetting* in ihren Abstufungen, d.h. Simulation (N = 35), AR (N = 46) und HMD-AR (N = 41), auf die abhängige Variable *Akzeptanz* bzw. *Usability* haben (Bortz & Schuster, 2010; Döring & Bortz, 2016). Hierfür wurde die einfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) bzw. Kovarianzanalyse (ANCOVA) angewandt (vgl. Kapitel 9.4). Für einen Gruppenvergleich mit mindestens zwei unabhängigen Stichproben wird die einfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) durchgeführt. Dabei soll ausgehend von einer Stichprobe auf die Population geschlossen werden (Kuckartz et al., 2013). Mit der Varianzanalyse können die Stufen einer kategorialen unabhängigen Variable, d.h. eines Faktors, hinsichtlich einer intervallskalierten abhängigen Variable verglichen werden (Bortz & Döring, 2016). Werden zusätzlich Kovariaten in die Varianzanalyse miteinbezogen, so spricht man von einer Kovarianzanalyse (ANCOVA) (Backhaus et al., 2011; Döring & Bortz, 2002; Field, 2018). Wird der Einfluss dieser Störgrößen auf die abhängige Variable herauspartialisiert und damit statistisch kontrolliert, kann die interne Validität der Erhebung erhöht werden (Döring & Bortz, 2002). In der vorliegenden Arbeit soll der Einfluss des Faktors Gestaltung der Lernumgebung auf die abhängige Variable *Akzeptanz* bestimmt werden. Als Kovariaten fungieren dabei die drei erklärenden Kontrollvariablen *Individualisierbarkeit*, *Problemorientierte Didaktik* und *Voraussichtlicher Lernerfolg*. Sie wurden im Zuge der vorgeschalteten Regressionsanalysen als Einflussgrößen ermittelt, indem der auf die Kovariaten fallende Varianzanteil gemessen wurde (vgl. Backhaus et al., 2011). Da die Usability-Merkmale als Kovariaten eingeführt werden, ist ein Teil der Gesamtvarianz gegebenenfalls auf die Variation der Usability zurückzuführen. Würden diese nicht erfasst werden, so wäre eine erhöhte Reststreuung die Folge. Mittels Kovarianzanalyse wird die Akzeptanz rechnerisch um den Einfluss der Usability bereinigt (Döring & Bortz, 2016). Die sollte zu einer Reduzierung der Fehlervarianz der abhängigen Variable *Akzeptanz* führen (Backhaus et al., 2011; vgl. Döring & Bortz, 2016). Die Literatur liefert zwei wesentliche Voraussetzungen, die für die Durchführung einer

ANOVA und demzufolge auch für die ANCOVA erfüllt sein müssen (vgl. Bortz & Schuster, 2010). Ein F -Test kann nur dann angewandt werden, wenn die abhängige Variable intervallskaliert ist. Ferner sollten im Zusammenhang mit der Signifikanztestung alle Daten normalverteilt sein. Die Validität des F -Tests kann jedoch auch bei Voraussetzungsverletzung sichergestellt werden (s.o. Kapitel 8.6.1 zentraler Grenzwertsatz). Abgesehen davon sollte Varianzhomogenität vorliegen. Damit ist gemeint, dass keine signifikanten Unterschiede bei den Varianzen der einzelnen Faktorstufen festzustellen sind. Sobald ein signifikanter Einfluss vorliegt, gilt dessen Stärke zu klären. Die Überprüfung auf Varianzhomogenität erfolgt durch den Levene-Test. Liefert der Test als Ergebnis ein Signifikanzniveau von $p > .05$, so unterscheiden sich die Fallgruppen hinsichtlich der Varianzen nicht und die Gleichheit derer ist gesichert (Bühl, 2019). Für die Varianzaufklärung wird die Effektstärke η^2 herangezogen (Kuckartz et al., 2013). Dabei kann zwischen drei Effektstufen differenziert werden: kleine (.01), mittlere (.06) und große Effekte (.14) (Cohen, 1988). Auf Basis der Kovarianzanalyse kann sich dann ein paarweiser Gruppenvergleich anschließen, der die Kovariaten berücksichtigt und ihren Effekt auf die abhängige Variable eliminiert. Überdies fordert das mathematische Modell der Kovarianzanalyse homogene Steigungen der Regressionen in den drei Gruppen (Bortz & Schuster, 2010). Ferner sollte die Korrelation zwischen abhängiger Variable und die Kovariate signifikant sein. Derart wird sichergestellt, dass die Fehlervarianz nicht zufällig, sondern effektiv durch die Berücksichtigung der Kovariaten reduziert wird (Bortz & Schuster, 2010). Sind die Gruppen ungleich groß, so sollte der Post-Hoc-Test weitgehend robust gegenüber derartiger Unterschiede sein. Der Bonferroni-Test, der überdies die Voraussetzung der Varianzhomogenität sogar verletzen darf, eignet sich an dieser Stelle (Tiemann & Körbs, 2014).

9 Ergebnisse Hauptstudie 1

9.1 Deskriptive Analyse

Bevor die Skalen auf Reliabilität geprüft werden konnten, wurden die deskriptiven Statistiken ermittelt und eine Itemanalyse analog zur Vorstudie (vgl. Kapitel 6.5.2) durchgeführt. Dabei lag die Itemschwierigkeit überwiegend in einem Bereich zwischen 20 und 80 %. Folglich waren die Items von der Schwierigkeit her angemessen (Bühl, 2019). In Hinblick auf den Usability- und Akzeptanz-Test waren einige Items mit durchschnittlich 84 % Zustimmung etwas zu leicht (vgl. Döring & Bortz, 2002). Aufgrund der inhaltlichen Bedeutsamkeit dieser Items zur fachspezifischen Bewertung der AR-Lernumgebung wurden die Items jedoch nicht eliminiert. Lediglich die beiden Hauptskalen zu den Einstellungen hinsichtlich digitaler Medien und die Usability-Skalen zur Wirkung der Medien und zum voraussichtlichen Lernerfolg deuteten mit Werten von .20 auf eine Normalverteilung hin. Da die weiterführenden Analysen im Hinblick auf die Signifikanztestung (s. Kapitel 9.4.1 und 9.4.2) jedoch Normalverteilung fordern, sollte die Prämisse in allen Skalen sichergestellt werden: Mit einer Stichprobengröße von 157 (Personenmerkmale) bzw. 122 (Akzeptanz und Usability) und einem Umfang von mindestens 30 Probanden in den Vergleichsgruppen wurde das gesamte Datenmaterial laut zentralem Grenzwertsatz als normalverteilt angesehen (vgl. Kapitel 8.6.1).

9.1.1 Skalendokumentation der Personenmerkmale

Analog zu den Ergebnissen aus der Pilotstudie gilt die Reliabilität in allen Hauptskalen des Erhebungsinstruments zu den Merkmalen des Individuums (Einstellungen und Selbstwirksamkeit, vgl. Tabelle 25 und Tabelle 26) als gesichert. Die Skalenreliabilitätsberechnungen lieferten sehr gute α -Werte zwischen .87 und .97. Bis auf die Subskala *Einstellungen (dig) Allg* ($\alpha = .66$) weisen alle Subskalen zu den Einstellungen hinsichtlich digitaler Medien und AR akzeptable bis gute Werte mit $.73 > \alpha > .82$ auf (vgl. Tabelle 25). Mit Mittelwerten deutlich über dem mittleren Skalenniveau von 1.5 wurde der Nutzen digitaler Medien und AR hoch eingeschätzt. Vor allem die Einstellungen im Allgemeinen (Digitale Medien: $M = 2.37$ und AR: $M = 2.25$) erreichten sehr hohe Werte. Entsprechend zeichnet sich eine Aufgeschlossenheit gegenüber der digitalen Schulentwicklung ab. Dabei konnte bei der Skala *Einstellungen (dig) Allg* die höchste Standardabweichung ($SD = 0.56$) festgestellt werden. Die Nützlichkeit digitaler Medien und Innovationen wie AR für den eigenen Fachunterricht mit Blick auf den Wissenserwerb (TPCK-E) scheint im Verhältnis zur Pädagogik etwas in den Hintergrund zu rücken. Dies zeigt sich an den Skalen *Einstellungen (dig) TPCK* ($M = 1.92$) und *Einstellungen (AR) TPCK* ($M = 1.80$) im Vergleich zu den Skalen *Einstellungen (dig) TPK* ($M = 2.07$) und *Einstellungen (AR) TPK* ($M = 1.75$). Dabei wird angemerkt, dass die Einstellungen zu AR in den Ebenen TPK und TPCK niedrigere Werte als zu digitalen Medien in denselben Subskalen aufweisen.

Tabelle 25. Skalendokumentation des Erhebungsinstruments zu den Personenmerkmalen (Einstellungen) mit vierstufiger Likert-Skala (0: „stimme gar nicht zu“ bis 3: „stimme voll zu“) in Hauptstudie 1 unter Angabe der Probandenanzahl (N), Itemanzahl pro Skala (n), Cronbachs Alpha, wenn Item weggelassen (α), Mittelwert (M), Median (Mdn) und Standardabweichung (SD).

Haupt-/Subskala Personenmerkmale (N = 157)	α	M	Mdn	SD
Einstellungen (dig) gesamt (n = 18)	.88	2.04	2.06	0.41
<i>Einstellungen (dig) TPK</i> (n = 6)	.74	2.07	2.00	0.45
<i>Einstellungen (dig) TPCK</i> (n = 9)	.81	1.92	2.00	0.46
<i>Einstellungen (dig) Allg</i> (n = 3)	.66	2.37	2.33	0.56
Einstellungen (AR) gesamt (n = 20)	.89	1.89	1.90	0.40
<i>Einstellungen (AR) TPK</i> (n = 6)	.78	1.75	1.83	0.48
<i>Einstellungen (AR) TPCK</i> (n = 9)	.80	1.80	1.89	0.47
<i>Einstellungen (AR) Allg</i> (n = 5)	.78	2.25	2.40	0.46

Der gute Cronbachs alpha-Wert in der Hauptskala zur Selbstwirksamkeit zu digitalen Medien konnte durch die Ergebnisse der Subskalen bestätigt werden (α bzw. $r^2 > .80$). Gleiches gilt für die Reliabilitätsanalyse der Skalen zur Selbstwirksamkeit hinsichtlich AR. Es wurden durchweg exzellente Werte der internen Konsistenz gemessen ($\alpha > .92$). Erwartungsgemäß liegen die Selbstwirksamkeitserwartungen hinsichtlich digitaler Medien über und im Hinblick auf AR unter dem mittleren Skalenniveau (s. Tabelle 26; vgl. H2.1₁ und H2.2₁ in Kapitel 5.2; Vogelsang et al., 2019; Waffner, 2020; Wyss et al., 2022).

Tabelle 26. Skalendokumentation des Erhebungsinstruments zu den Personenmerkmalen (Selbstwirksamkeit) mit vierstufiger Likert-Skala (0: „stimme gar nicht zu“ bis 3: „stimme voll zu“) in Hauptstudie 1 unter Angabe der Probandenanzahl (N), Itemanzahl pro Skala (n), Cronbachs Alpha, wenn Item weggelassen (α), Spearman-Brown-Koeffizienten (r^{**}), Mittelwert (M), Median (Mdn) und Standardabweichung (SD).

Haupt-/Subskala Personenmerkmale (N = 157)	α (r^{**})	M	Mdn	SD
Selbstwirksamkeit (dig) gesamt (n = 15)	.87	1.89	1.93	0.45
<i>Selbstwirksamkeit (dig) TPK</i> (n = 6)	.79	1.94	2.00	0.54
<i>Selbstwirksamkeit (dig) TPCK</i> (n = 7)	.81	1.81	1.86	0.51
<i>Selbstwirksamkeit (dig) TK</i> (n = 2)	.81*	2.06	2.00	0.70
Selbstwirksamkeit (AR) gesamt (n = 13)	.97	0.74	0.62	0.72
<i>Selbstwirksamkeit (AR) TPK</i> (n = 6)	.93	0.77	0.67	0.75
<i>Selbstwirksamkeit (AR) TPCK</i> (n = 7)	.95	0.70	0.57	0.72

Chemielehrkräfte schätzten ihre eigenen Fähigkeiten im Umgang mit herkömmlichen digitalen Anwendungen durchweg gut ein ($M \geq 1.92$). Die zugehörige Streuung kann mit Werten zwischen 0.45 und 0.7 beschrieben werden. Wird dabei die Ebene des TPCK näher betrachtet, so scheinen die Probanden diesbezüglich die größten Unsicherheiten aufzuweisen ($M = 1.81$). Die Subskala zum TPK demonstriert mit $M = 1.94$ höhere Werte und wurde im Hinblick auf die rein technische Kompetenz am höchsten bewertet ($M = 2.06$). Letztere weist mit Abstand die

höchste Standardabweichung auf. Werden die Selbstwirksamkeitserwartungen angesichts AR fokussiert, so handelt es sich stets um Mittelwerte bei ca. 0.7. Die Fähigkeiten hinsichtlich TPK wurden mit $M = 0.77$ auch bei AR höher als hinsichtlich TPCK mit $M = 0.7$ eingeschätzt. Die erhöhten Standardabweichungen in den Skalen zu AR ($SD > 0.7$) deuten auf eine hohe Streuung hin.

Es wird konkludiert, dass die hohe interne Konsistenz der Skalen auf eine hohe Reliabilität des Fragebogens zur Erfassung der Personenmerkmale hinweist. Ferner sahen die Chemielehrkräfte Möglichkeiten und Nutzen im Einsatz digitaler Medien und AR. Wenngleich sie ihre Fähigkeiten im Umgang mit digitalen Anwendungen gut einschätzten, stuften sie ihre Selbstwirksamkeit in Hinblick auf AR sehr niedrig sein. Dabei deuten die Daten aber auch auf eine größere Spannweite hin.

9.1.2 Skalendokumentation der Akzeptanz und Usability

Auch in Hinblick auf das Usability- und Akzeptanz-Erhebungsinstrument kann davon ausgegangen werden, dass alle Skalen akzeptable bis sehr gute Werte der internen Konsistenz demonstrierten. Bis auf die Skalen *Angemessenheit*, *Individualisierbarkeit* und *Verständlichkeit der Medien* mit alpha-Werten zwischen .69 und .78 besitzen die Usability- und Akzeptanz-Skalen hohe Reliabilitäten (alle Cronbachs $\alpha > .79$). Dabei zeigt sich in der Skala *Wirkung der Medien* ein exzellenter Wert der internen Konsistenz ($\alpha = .90$). Tabelle 27 führt die zugehörige Skalendokumentation über alle Gruppen hinweg ($N = 122$) auf.

Tabelle 27. Skalendokumentation des Akzeptanz- und Usability-Tests mit vierstufiger Likert-Skala (0: „stimme gar nicht zu“ bis 3: „stimme voll zu“) in Hauptstudie 1 unter Angabe der Probandenanzahl (N), Itemanzahl pro Skala (n), Cronbachs Alpha, wenn Item weggelassen (α), Mittelwert (M), Median (Mdn) und Standardabweichung (SD).

Skala Akzeptanz- und Usability (N = 122)	α	M	Mdn	SD
Akzeptanz (n = 7)	.80	2.38	2.50	0.45
Angemessenheit der Anforderungen (n = 6)	.78	2.20	2.33	0.49
Technische Bedienbarkeit (n = 9)	.88	2.34	2.33	0.47
Individualisierbarkeit (n = 4)	.69	2.05	2.00	0.56
Problemorientierte Didaktik (n = 17)	.89	2.40	2.47	0.42
Verständlichkeit der Medien (n = 12)	.74	2.33	2.42	0.35
Wirkung der Medien (n = 15)	.90	2.34	2.40	0.43
Voraussichtliche Motivation (n = 6)	.82	2.37	2.33	0.50
Voraussichtlicher Lernerfolg (n = 17)	.86	2.19	2.18	0.39

Insgesamt schätzten die Chemielehrkräfte die digitalen Lernumgebungen (Simulation, AR und HMD-AR) mit Mittelwerten zwischen 2.05 und 2.47 durchweg positiv ein. Insbesondere scheinen die Probanden das Konzept der Lernanwendungen anzunehmen. Dies wird an dem hohen Mittelwert in der Akzeptanz-Skala mit seiner niedrigen Streuung ($M = 2.38$, $SD = 0.45$) ersichtlich. Die Individualisierbarkeit wurde mit $M = 2.05$ am niedrigsten eingeschätzt. In diesem Zu-

sammenhang muss die erhöhte Standardabweichung ($SD = 0.56$) dieser Skala erwähnt werden. Sie grenzt sich von den anderen Skalen ab und verweist auf eine hohe Streuung. Entsprechend ist dieses Resultat mit Vorsicht zu interpretieren (vgl. Kapitel 10.2). Obgleich die Mittelwerte deutlich über dem mittleren Skalenniveau liegen, darf die heterogene Einschätzung im Hinblick auf die Angemessenheit ($M = 2.20$, $SD = 0.49$) und die voraussichtliche Motivation ($M = 2.37$, $SD = 0.5$) nicht unbeachtet bleiben.

Mit Blick auf den Gruppenvergleich (s. auch Kapitel 9.4) wurden die Skalenreliabilitäten getrennt nach Simulations-, AR- und HMD-AR-Gruppe ermittelt. Da die Abweichungen der einzelnen Cronbachs alpha in Bezug auf die Gesamt- und Subskalen marginal sind und die in Tabelle 27 zusammengefassten Resultate nur untermauern, werden diese nicht weiter thematisiert und sind im Anhang aufzufinden.

Nachdem die oben angeführte deskriptive Statistik (vgl. Tabelle 27) keine Auskünfte über die Einschätzungen hinsichtlich der verschiedenen Lernanwendungen (Simulation, AR und HMD-AR) gibt, wurde vorerst eine deskriptive Analyse der Usability- und Akzeptanz-Skalen in den drei Gruppen durchgeführt (vgl. Tabelle 28). Ein varianzanalytischer Vergleich folgt in Kapitel 9.4.

Tabelle 28. Deskriptive Statistik des Akzeptanz- und Usability-Tests mit vierstufiger Likert-Skala (0: „stimme gar nicht zu“ bis 3: „stimme voll zu“) in Hauptstudie 1 im Gruppenvergleich mit Simulation ($N = 35$), AR ($N = 46$) und HMD-AR ($N = 41$) unter Angabe des Mittelwerts (M), Medians (Mdn) und der Standardabweichung (SD).

Skala (Usability/ Akzeptanz)	M			Mdn			SD		
	Sim	AR	HMD-AR	Sim	AR	HMD-AR	Sim	AR	HMD-AR
Akzeptanz	2.37	2.51	2.24	2.43	2.64	2.24	0.38	0.43	0.50
Angemessenheit der Anforderungen	2.33	2.24	2.05	2.33	2.33	2.05	0.44	0.50	0.50
Technische Bedienbarkeit	2.40	2.42	2.20	2.44	2.50	2.20	0.49	0.46	0.45
Individualisierbarkeit	2.16	2.08	1.91	2.25	2.25	1.91	0.47	0.55	0.62
Problemorientierte Didaktik	2.44	2.40	2.37	2.53	2.47	2.37	0.37	0.44	0.43
Verständlichkeit der Medien	2.36	2.36	2.28	2.42	2.42	2.28	0.39	0.33	0.33
Wirkung der Medien	2.38	2.38	2.28	2.40	2.40	2.28	0.39	0.44	0.45
Voraussichtlicher Motivation	2.32	2.36	2.41	2.50	2.33	2.41	0.55	0.48	0.48
Voraussichtlicher Lernerfolg	2.26	2.21	2.12	2.35	2.18	2.12	0.31	0.47	0.37

Werden die Mittelwerte der Akzeptanz-Skala verglichen, so ragte die AR-Gruppe ($M = 2.51$, $SD = 0.43$) heraus. Die Simulation erreichte mit $M = 2.37$ ($SD = 0.38$) den mittleren und die

HMD-AR mit $M = 2.24$ ($SD = 0.5$) den niedrigsten Mittelwert. Die Angemessenheit der Anforderungen lieferte in den Tablet-Gruppen nahezu ähnliche Werte (Simulation: $M = 2.33$, $SD = 0.44$ und AR: $M = 2.24$, $SD = 0.5$), wobei auch dieses Merkmal von der HMD-AR-Gruppe geringer eingeschätzt wurde ($M = 2.05$, $SD = 0.5$). Die Technik wurde in den Tablet-Gruppen entsprechend den Erwartungen sehr ähnlich mit einem Mittelwert von ca. 2.4 bewertet. Im Vergleich dazu scheint die Technik der HMD-AR am negativsten beurteilt worden zu sein ($M = 2.05$, $SD = 0.45$). Die Streuungen lieferten in allen drei Gruppen ähnliche Werte. Die generell etwas niedriger eingestufte *Individualisierbarkeit* offenbarte bei der HMD-AR-Gruppe den kleinsten Mittelwert mit $M = 1.91$ und eine stark erhöhte Standardabweichung von $SD = 0.62$. Die Simulations-Gruppe erreichte ein M von 2.16 ($SD = 0.47$) und die AR-Gruppe ein M von 2.08 mit einer ebenfalls hohen Standardabweichung von 0.55. Tabelle 28 demonstriert, dass die Skalen *Problemorientierte Didaktik*, *Verständlichkeit der Medien*, *Wirkung der Medien* und *Voraussichtlicher Lernerfolg* in allen drei Gruppen relativ ähnliche Ergebnisse mit $2.45 > M > 2.11$ und $0.46 > SD > 0.30$ erzielten. Hinsichtlich des motivationalen Charakters lieferte die HMD-AR mit $M = 2.41$ ($SD = 0.48$) den höchsten Wert und wurde von den Lehrkräften am positivsten eingeschätzt (vgl. Simulation: $M = 2.32$, $SD = 0.55$ und AR: $M = 2.36$, $SD = 0.48$). Uneinigkeit scheint in der Simulations-Gruppe hinsichtlich der voraussichtlichen Motivation zu existieren, da diese die höchste Streuung aufwies. Erwartungsgemäß wurden in allen drei Gruppen durchgehend Werte deutlich über dem mittleren Skalenniveau erreicht (vgl. Tabelle 28). Auffallend dabei ist, dass die HMD-AR-Gruppe im Allgemeinen die geringsten Werte erreichte. Die Bewertungen hinsichtlich der non-AR- und AR-Lernumgebungen ähnelten sich am stärksten. Ferner konnten unentwegt erhöhte Standardabweichungen bei der Usability- und Akzeptanzeinschätzung der HMD-AR-Lernumgebung wahrgenommen werden.

Zusammenfassend wird angeführt, dass das Konzept der Lernumgebung positiv eingeschätzt wurde. Dabei erfährt nicht nur die konzeptionelle Aufbereitung, sondern auch die mediale und instruktionale Gestaltung jeder der drei Lernumgebungen eine hohe Akzeptanz. Die positiven Usability-Bewertungen stützen diese Annahme. Die Ergebnisse zur Akzeptanz und Usability der simulations- und AR-gestützten Lernumgebungen auf dem Tablet ähneln einander, wobei das AR-Setting am ehesten angenommen zu sein scheint und tendenziell höhere Werte aufweist. Dagegen wurden, bis auf die Skala *Voraussichtlicher Lernerfolg*, in der HMD-AR-Gruppe durchweg verhältnismäßig die kleinsten Mittelwerte gemessen. Die niedrigeren Messwerte in den Skalen *Individualisierbarkeit* und *Voraussichtlicher Lernerfolg* (vgl. Tabelle 28) zur konzeptionellen Einschätzung, über alle drei Gruppen hinweg, gehen größtenteils auf die kleineren Mittelwerte in der HMD-AR-Gruppe zurück. Ferner zeichnen sich in Hinblick auf die SD -Werte hohen Streuungen in dieser Gruppe ab, die ein sehr heterogenes Bild nach sich ziehen.

9.2 Korrelationsanalysen

Neben den Hauptskalen zu den Einstellungen und Selbstwirksamkeitserwartungen wurden zusätzlich die Subskalen *TPCK*, *TCK*, *TK* und *allgemein* auf ihre Zusammenhänge über die gesamte Stichprobe hinweg untersucht. Obgleich es sich stets um metrische Skalenniveaus handelt, kann die Linearität (vgl. Kapitel 8.6.3) aufgrund Sichtung der Streudiagramme nicht durchweg für alle (Sub-) Skalen sichergestellt werden. Ferner zeigt sich nach Sichtung aller Boxplots von jeder Variable eine Auffälligkeit in den Einstellungen zu AR (gesamt). Dieser Boxplot (s. Abbildung 33) weist einen Wert auf, der mehr als 3 Interquartilsabstände vom Median entfernt liegt und somit als Ausreißer anzusehen ist.

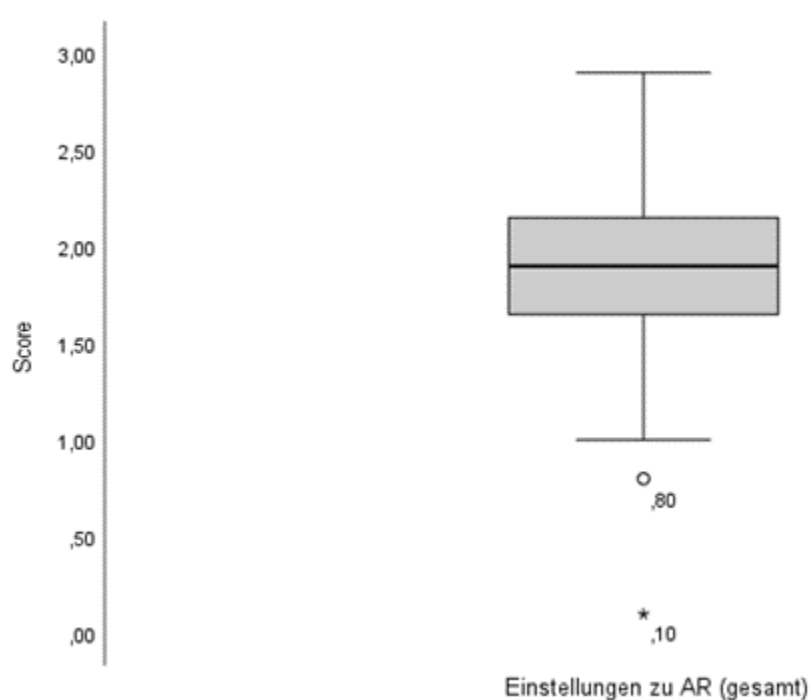


Abbildung 32. Boxplot-Darstellung für die Hauptskala Einstellungen zu AR (gesamt: N = 122, Sim: N = 35, AR: N = 46, HMD-AR: N = 41) mit zwei Ausreißern (Box = 25 - 75 % Quartile, schwarzer Querbalken = Median).

Es wurde sich gegen den Fallausschluss des Ausreißers aus der Gesamtstichprobe entschieden, da dies kein anderes Ergebnis nach sich ziehen würde.

9.2.1 Zusammenhänge zwischen den Einstellungen und der Akzeptanz bzw. Usability

Die bivariaten Korrelationsanalysen zwischen der Akzeptanz bzw. Usability und den Einstellungen hinsichtlich digitaler Medien bzw. AR ergab erwartungsgemäß ein heterogenes Bild (vgl. Bürg, 2005). Die Ergebnisse demonstrierten signifikante Zusammenhänge zwischen der Akzeptanz und den Einstellungen zu digitalen Medien und AR mit r_s -Werten größer gleich .25 in den Hauptskalen auf dem .01-Signifikanzniveau (vgl. Gesamt in Tabelle 29). Dabei zeigte sich bezogen auf die Einstellungen zu AR fast eine mittlere Korrelation ($r_s = .30$). Eine positi-

vere Bewertung der Einstellungen ging folglich mit einer höheren Annahme der Lernumgebungen einher. Hinsichtlich der Usability waren jeweils die Individualisierbarkeit, Wirkung der Medien, die voraussichtliche Motivation sowie der voraussichtliche Lernerfolg hoch mit den Einstellungen hinsichtlich digitaler Medien bzw. AR (Gesamt) assoziiert. Die Analyse lieferte demnach in den Hauptskalen (hoch) signifikante Werte mit $.19 \leq r_s \leq .39$ (vgl. Tabelle 29). In Hinblick auf die Forschungsfrage FF5₁ (vgl. Kapitel 5.2) gehen hohe Werte in den Skalen zum Schultransfer mit hohen Werten in den Skalen zur Einstellung hinsichtlich digitaler Medien und AR einher. Die Subskalen zu TPK, TPCK und Allgemeinen Einstellungen (Allg) in Tabelle 29 stützen diese Resultate mit durchgängigen p -Werten wenigstens $< .05$. Der Zusammenhang zwischen der wahrgenommenen problemorientierten Didaktik und den Einstellungen hinsichtlich digitaler Medien war in der Hauptskala sehr schwach und zeigte keine statistische Signifikanz auf. Lediglich im Hinblick auf TPCK wurde ein signifikanter Wert von $.23$ mit $p = .05$ erreicht (vgl. Tabelle 29). Im Vergleich dazu war die wahrgenommene problemorientierte Didaktik etwas stärker mit den Einstellungen zu AR assoziiert ($r_s = .27, p < .01$). Das signifikante Ergebnis in der Hauptskala wurde durch die Subskalen TPK ($r_s = .28, p < .01$) und TPCK ($r_s = .22, p < .05$) gestützt. Tabelle 29 demonstriert, dass eine mit höheren Werten eingeschätzte Usability hinsichtlich der Individualisierbarkeit, Wirkung der Medien, des Schultransfers mit höheren Werten bei den Einstellungen hinsichtlich digitaler Medien bzw. AR einhergeht. Eine positivere Einschätzung des Merkmals *Problemorientierte Didaktik* der Lernumgebungen scheint zudem mit positiveren Beurteilungen der Einstellungen hinsichtlich AR zusammenzuhängen. Ferner weist die Korrelationsmatrix (s. Tabelle 29) in den restlichen Usability-Skalen *Angemessenheit der Anforderungen*, *Technische Bedienbarkeit* und *Verständlichkeit der Medien* nur sehr schwache bis keine Korrelationen ($0 \leq r_s \leq .16$) mit den Einstellungen auf.

Tabelle 29. Bivariate Korrelationen zwischen der Skala Akzeptanz bzw. Usability und den Hauptskalen zu Einstellungen hinsichtlich digitaler Medien und AR (abgekürzt: Gesamt), einschließlich der Subskalen zu TPACK (N = 115).

	Einstellungen							
	Digitale Medien				AR			
	Gesamt	TPK	TPCK	Allg	Gesamt	TPK	TPCK	Allg
Akzeptanz	.250**	.192*	.232*	.274**	.295**	.286**	.212*	.292**
Angemessenheit d. Anf.	.057	.003	.051	.109	.152	.119	.136	.123
Technische Bedienbarkeit	.050	.016	.031	.149	.095	.038	.073	.156
Individualisierbarkeit	.244**	.165	.229*	.266**	.357**	.324**	.294**	.232*
Problemorientierte Didaktik	.169	.054	.234*	.119	.265**	.280**	.222*	.111
Verständlichkeit der Medien	.097	.068	.118	.129	.158	.111	.132	.109
Wirkung der Medien	.191*	.137	.173	.188*	.300**	.326**	.243**	.158
Vorauss. Motivation	.288**	.216*	.261**	.219*	.383**	.258**	.312**	.288**
Vorauss. Lernerfolg	.255**	.154	.287**	0.172	.394**	.411**	.325**	.222*

Anmerkung. ** $p < .01$, * $p < .05$

9.2.2 Zusammenhänge zwischen der Selbstwirksamkeit und der Akzeptanz bzw. Usability.

Insgesamt zeigen sich äußerst marginale Zusammenhänge zwischen den Haupt- bzw. Subskalen zu den Selbstwirksamkeitserwartungen hinsichtlich digitaler Medien bzw. AR und der Akzeptanz sowie Usability. Diese Ergebnisse stehen im Einklang mit den Analysen von Bürg (2005). Demnach scheinen die Selbstwirksamkeitserwartungen weitgehend unabhängig von der Akzeptanz zu sein. Die Korrelationsmatrix (vgl. Tabelle 30) zeigt, dass eine sehr schwach ausgeprägte Korrelation zwischen der Gesamtskala zur Selbstwirksamkeit hinsichtlich digitaler Medien und der Akzeptanz vorherrscht ($r_s = .10$). Die Einschätzungen der eigenen Fähigkeiten im Umgang mit AR standen in keinem Zusammenhang mit der Zufriedenheit der Lernumgebung. Mit Blick auf die Wirkung der Medien zeigt Tabelle 30 auf, dass die Haupt- und Subskalen der Selbstwirksamkeit zu AR signifikant ($p < .05$) korrelieren. Höhere Einschätzungen der wahrgenommenen Fähigkeiten im Umgang mit AR gehen mit einer positiveren Bewertung der medialen Wirkung einher ($r_s = .20$). Erste Tendenzen von schwachen Zusammenhängen zwischen der Selbstwirksamkeit hinsichtlich AR und der Usability können den Skalen *Problemorientierte Didaktik* (Haupt- und Subskalen mit $r_s \approx .14$) und *Verständlichkeit der Medien* (Gesamt mit $r_s = -.13$ und TPK mit $r_s = -.16$) entnommen werden (s. Tabelle 30). Überdies war die Selbstwirksamkeit hinsichtlich digitaler Medien jeweils schwach mit der Angemessenheit der Anforderungen, der technischen Bedienbarkeit, der Verständlichkeit der Medien und der voraussichtlichen Motivation assoziiert (vgl. r_s -Werte bei ca. $\pm .10$ in Tabelle 30).

Tabelle 30. Bivariate Korrelationen zwischen der Skala Akzeptanz bzw. Usability und den Hauptskalen zu Selbstwirksamkeitserwartungen hinsichtlich digitaler Medien und AR (abgekürzt: Gesamt), einschließlich der Subskalen zu TPACK (N = 115).

	Selbstwirksamkeit						
	Digitale Medien				AR		
	Gesamt	TPK	TPCK	TK	Gesamt	TPK	TPCK
Akzeptanz	.104	.098	.133	.024	-.069	-.073	-.075
Angemessenheit der Anf.	.108	.107	.111	.119	.079	.064	.075
Technische Bedienbarkeit	.119	.105	.104	.138	-.009	-.025	-.028
Individualisierbarkeit	.044	.031	.017	.123	-.043	-.009	-.081
Problemorientierte Didaktik	-.029	-.068	.020	.023	-.148	-.155	-.118
Verständlichkeit der Medien	-.105	-.068	-.029	-.126	-.127	-.159	-.071
Wirkung der Medien	-.011	.003	.026	-.092	-.199*	-.192*	-.190*
Vorauss. Motivation	.126	.129	.145	.024	-.098	-.067	-.115
Vorauss. Lernerfolg	.043	.100	.053	-.035	-.067	-.073	-.063

Anmerkung. ** $p < .01$, * $p < .05$

9.2.3 Zusammenhänge zwischen der Usability und der Akzeptanz

Bei den Merkmalen der Lernumgebung zeigte sich bei bivariater Betrachtung mit der Akzeptanz ein eindeutigeres Bild. Tabelle 31 demonstriert die Korrelationen der gesamten Stichprobe (N = 122). Es zeigen sich durchweg signifikante Werte mit $p < .10$. Dabei waren die

funktionalen Gestaltungskriterien schwächer mit der Akzeptanz assoziiert (Angemessenheit der Anforderungen: $r_s = .24$ und Technische Bedienbarkeit: $r_s = .25$). Die Individualisierbarkeit und Verständlichkeit der Medien lieferten mit $r_s > .35$ mittlere Zusammenhänge. Alle anderen Usability-Skalen korrelierten mit $r_s > .50$ hoch mit der Akzeptanz. Insgesamt scheinen hohe Einschätzungen hinsichtlich der Usability mit einer hohen Zufriedenheit der Lernumgebung einherzugehen.

Tabelle 31. Korrelation der acht Usability-Skalen mit der Akzeptanz-Skala (N = 122).

	Akzeptanz
Angemessenheit der Anforderungen	.240**
Technische Bedienbarkeit	.254**
Individualisierbarkeit	.468**
Problemorientierte Didaktik	.535**
Verständlichkeit der Medien	.358**
Wirkung der Medien	.536**
Voraussichtliche Motivation	.514**
Voraussichtlicher Lernerfolg	.558**

Anmerkung. ** $p < .01$, * $p < .05$

9.3 Regressionsanalysen

Die Literatur verweist häufig auf einen Einfluss der Personenmerkmale sowie der Usability auf die Akzeptanz (vgl. Bürg, 2005). Dies soll nachstehend geprüft werden. Auf Basis der Korrelationsanalysen werden daher im Folgenden die Wirkungsbeziehungen zwischen den Merkmalen des Individuums bzw. der Usability und der Akzeptanz sowie den Merkmalen des Individuums und der Usability demonstriert. Bevor die Zusammenhangsmodelle zur Vorhersage der Usability bzw. Akzeptanz entworfen wurden, mussten jeweils die Voraussetzungen für die lineare Regressionsanalyse (vgl. Kapitel 8.6.4) geprüft werden:

Es konnte stets ein linearer Zusammenhang zwischen den für die Regressionsanalysen gewählten Variablen festgestellt werden. Auch die Prämisse der Modellvollständigkeit war erfüllt, da eine schrittweise Regressionsanalyse mit einer begrenzten Anzahl an ausgewählten unabhängigen Variablen durchgeführt wurde. Die Wahrscheinlichkeit eines nicht signifikanten Einflussfaktors sollte mit der minimierten Variablenanzahl im Regressionsmodell sinken. Auch die Multikollinearität konnte für alle Modelle ausgeschlossen werden. Neben der Korrelationsmatrix als ersten Eindruck, bestätigte final die Kollinearitätsstatistik mit *VIF*-Werten kleiner 10 die lineare Unabhängigkeit bei jenen Modellen, die mindestens zwei Prädiktoren einschlossen. Ferner deuteten die Streudiagramme bzw. Residuenplots auf nicht vorhandene Autokorrelationen und Heteroskedastizität hin. Die Residuen schienen daher stets normalverteilt zu sein (vgl. Bortz & Schuster, 2010), sodass die Regressionsmodelle und ihre Koeffizienten auf statistische Signifikanz untersucht werden konnten.

9.3.1 Wirkung der Merkmale des Individuums auf die Akzeptanz

Es werden nachstehend lineare Regressionsanalysen dargestellt, die die Akzeptanz als Kriteriumsvariable betrachten. Die Erstwahl der (un)abhängigen Variablen erfolgte auf Basis der Ergebnisse aus den Korrelationsanalysen aus Kapitel 9.2. Es gilt anzumerken, dass die Zusammenhangsanalysen nahelegen, bestimmte Subkategorien mit höheren r_s -Werten (mindestens mit mittleren Zusammenhängen) hervorzuheben. Auch hinsichtlich der Personenmerkmale scheinen die Selbstwirksamkeitserwartungen zu digitalen Medien und AR als Prädiktoren in den Hintergrund zu rücken. Obgleich die Theorie einen Zusammenhang zwischen den Selbstwirksamkeitserwartungen und der Akzeptanz vermuten lässt (vgl. Venkatesh & Davis, 2000), wurde aufgrund der in Kapitel 9.2.2 beschriebenen geringen Korrelation der Selbstwirksamkeitserwartungen zu digitalen Medien und AR mit der Akzeptanz auf deren Einschluss verzichtet. Ihre r_s -Werte waren durchweg in allen Haupt- sowie Subskalen < 0.13 . Auch Bürg (2005) stellte in seinen Forschungen fest, dass die allgemeine Selbstwirksamkeit keinen signifikanten Einfluss auf die Einstellungsakzeptanz hat und die Sicherheit im Umgang mit digitalen Medien nur schwach mit der Akzeptanz korreliert. Folglich eigneten sich lediglich die Hauptskalen mit Blick auf die Einstellungen zu digitalen Medien und AR als Einflussfaktoren. Die schrittweise Regressionsanalyse zur Akzeptanz hinsichtlich der Beeinflussung durch die Einstellungen zu digitalen Medien und AR liefert das in Tabelle 32 dargestellte Modell. Dabei wird deutlich, dass die Einstellungen zu AR als einziger signifikanter Prädiktor mit 9.7 % einen minimalen Teil der Varianz aufklären.

Tabelle 32. Regressionsanalyse (stepwise) für die Akzeptanz als Kriteriumsvariable und die Einstellungen zu digitalen Medien und AR als Prädiktorvariablen (N = 122).

Prädiktoren	<i>B</i>	<i>Standardfehler</i>	<i>Beta</i>	<i>T</i>
Einstellungen zu AR (gesamt)	.396	.108	.325	3.648***

$R^2_{\text{korr.}} = .097, F(1,113) = 13.307, p < .001$

Anmerkung. *** $p < .001$, ** $p < .01$, * $p < .05$

9.3.2 Wirkung der Usability auf die Akzeptanz

Es wurden von den acht Usability-Skalen sechs Variablen als Prädiktoren für die Akzeptanz in ein weiteres Regressionsmodell aufgenommen. Bis auf die Skalen *Angemessenheit der Anforderungen* und *Technische Bedienbarkeit* konnten durchgehend hoch signifikante Zusammenhänge mit der Akzeptanz konstatiert werden (vgl. Kapitel 9.2.3). Die schrittweise Regression führte zu einem Modell mit drei Variablen, die einen signifikanten Erklärungsbeitrag leisten. Es kann mit 40.2 % ein bedeutsamer Teil der Varianz der Akzeptanz erklärt werden (vgl. Tabelle 33). Mit einem β -Gewicht von .326 liefert lediglich die problemorientierte Didaktik einen hoch signifikanten Wert und kann demnach als bedeutendster Prädiktor angesehen werden. Hiernach stellt der voraussichtliche Lernerfolg mit einem β -Wert von .245 ($p = .018$) den zweitwichtigsten Prädiktor dar. Auch die Individualisierbarkeit und die daraus resultierende Selbststeuerung der Lernumgebung beeinflussen die Akzeptanz der Lehrkräfte. Mit einem β -Gewicht

von .180 ($p = .041$) zeigt Tabelle 33, dass diese Variable im Vergleich zur problemorientierten Didaktik stark in den Hintergrund rückt. In dem Regressionsmodell bleiben die Variablen *Voraussichtliche Motivation*, *Wirkung der Medien* und *Verständlichkeit der Medien* aufgrund mangelnder Signifikanz unberücksichtigt.

Tabelle 33. Regressionsanalyse (stepwise) für die Akzeptanz als Kriteriumsvariable und ausgewählte Merkmale der Lernumgebung als Prädiktorvariablen (N = 122).

Prädiktoren	<i>B</i>	<i>Standardfehler</i>	<i>Beta</i>	<i>T</i>
Problemorientierte Didaktik	.354	.106	.326	3.332***
Voraussichtlicher Lernerfolg	.280	.117	.245	2.393*
Individualisierbarkeit	.146	.070	.180	2.067*

$$R^2_{\text{kor.}} = .402, F(3,118) = 28.166, p < .001$$

Anmerkung. *** $p < .001$, ** $p < .01$, * $p < .05$

9.3.3 Wirkung der Merkmale des Individuums auf die Usability

Werden den Korrelationsanalysen zu den Merkmalen des Individuums und der Lernumgebung die signifikanten Werte entnommen, so fallen erneut die Einstellungen zu AR und geringfügig zu digitalen Medien ins Gewicht. Diese beiden Variablen werden daher in den nachstehenden Regressionsmodellen als Prädiktorvariablen betrachtet. Mit Blick auf die Merkmale der Lernumgebung fungierten die Variablen *Individualisierung*, *Problemorientierte Didaktik*, *Wirkung der Medien*, *Voraussichtliche Motivation* und *Voraussichtlicher Lernerfolg* in den jeweiligen Modellen als Kriterien.

In Tabelle 34 sind die Ergebnisse der schrittweisen Regressionsanalyse für die Kriteriumsvariable *Individualisierung* demonstriert. Das Modell leistet mit einem korrigierten R^2 -Wert von .102 einen kleinen Erklärungsbeitrag der Varianz auf die Individualisierung.

Tabelle 34. Regressionsanalyse (stepwise) für die Individualisierung als Kriteriumsvariable und die Einstellungen zu digitalen Medien und AR als Prädiktorvariablen (N = 122).

Prädiktoren	<i>B</i>	<i>Standardfehler</i>	<i>Beta</i>	<i>T</i>
Einstellungen zu AR (gesamt)	.506	.135	.332	3.738***

$$R^2_{\text{kor.}} = .102, F(1,113) = 13.975, p < .001$$

Anmerkung. *** $p < .001$, ** $p < .01$, * $p < .05$

Die Ergebnisse der Regressionsanalyse zur problemorientierten Didaktik sind in Tabelle 35 dargestellt. Einzig allein die Einstellungen zu AR können mit einem kleinen Teil von 8.4 % die Varianz der Kriteriumsvariable *Problemorientierte Didaktik* aufklären. Ein ähnliches Ergebnis liefert das Regressionsmodell für die Wirkung der Medien als Kriterium und den Einstellungen zu AR als Prädiktor (vgl. Tabelle 36). Mit einem korrigierten R^2 -Wert von .75 konnte ein nur sehr kleiner Erklärungsbeitrag für die Varianz der Wirkung der Medien gemessen werden.

Tabelle 35. Regressionsanalyse (stepwise) für die problemorientierte Didaktik als Kriteriumsvariable und die Einstellungen zu digitalen Medien und AR als Prädiktorvariablen (N = 122).

Prädiktoren	<i>B</i>	<i>Standardfehler</i>	<i>Beta</i>	<i>T</i>
Einstellungen zu AR (gesamt)	.341	.101	.303	3.377**

$R^2_{\text{kor.}} = .084, F(1,113) = 11.405, p = .001$
 Anmerkung. *** $p < .001$, ** $p < .01$, * $p < .05$

Tabelle 36. Regressionsanalyse (stepwise) für die Wirkung der Medien als Kriteriumsvariable und die Einstellungen zu digitalen Medien und AR als Prädiktorvariablen (N = 122).

Prädiktoren	<i>B</i>	<i>Standardfehler</i>	<i>Beta</i>	<i>T</i>
Einstellungen zu AR (gesamt)	.333	.104	.288	3.191**

$R^2_{\text{kor.}} = .075, F(1,113) = 10.183, p = .002$
 Anmerkung. *** $p < .001$, ** $p < .01$, * $p < .05$

Die beiden Regressionsmodelle für die Kriteriumsvariablen *Voraussichtliche Motivation* und *Voraussichtlicher Lernerfolg* liefern mittlere Effekte (vgl. Tabelle 37 und Tabelle 38). In beiden Analysen zeigt sich der Prädiktor *Einstellungen zu AR* sehr bzw. höchst signifikant. Die Modelle leisten mit 13 % für die voraussichtliche Motivation bzw. 14.9 % für den voraussichtlichen Lernerfolg einen im Vergleich zu den oben angeführten Modellen besseren Erklärungsbeitrag der Varianz als für die (medien-) didaktische Gestaltung.

Tabelle 37. Regressionsanalyse (stepwise) für die voraussichtliche Motivation als Kriteriumsvariable und die Einstellungen zu digitalen Medien und AR als Prädiktorvariablen (N = 122).

Prädiktoren	<i>B</i>	<i>Standardfehler</i>	<i>Beta</i>	<i>T</i>
Einstellungen zu AR (gesamt)	.494	.116	.371	4.245***

$R^2_{\text{kor.}} = .130, F(1,113) = 18.020, p < .001$
 Anmerkung. *** $p < .001$, ** $p < .01$, * $p < .05$

Tabelle 38. Regressionsanalyse (stepwise) für den voraussichtlichen Lernerfolg als Kriteriumsvariable und die Einstellungen zu digitalen Medien und AR als Prädiktorvariablen (N = 122).

Prädiktoren	<i>B</i>	<i>Standardfehler</i>	<i>Beta</i>	<i>T</i>
Einstellungen zu AR (gesamt)	.420	.092	.395	4.573***

$R^2_{\text{kor.}} = .149, F(1,113) = 20.912, p < .001$
 Anmerkung. *** $p < .001$, ** $p < .01$, * $p < .05$

9.3.4 Zusammenfassende Betrachtung der Regressionsanalysen

Die Ergebnisse der schrittweisen Regressionsanalysen zeigen insgesamt auf, dass die Einstellungen zu AR einen signifikanten Einfluss sowohl auf die Usability als auch auf die Akzeptanz haben. Ferner sind es die problemorientierte Didaktik, der voraussichtliche Lernerfolg und die Individualisierung, die nicht nur als Kriteriumsvariablen zu betrachten sind, sondern sich auch als Prädiktorvariablen signifikant auf die Kriteriumsvariable *Akzeptanz* auswirken. Die zugehörige schrittweise Regressionsanalyse (vgl. Tabelle 33) zeigt einen sehr hohen Effekt. Entsprechend scheinen positive Einschätzungen hinsichtlich des Potentials von AR die Bewertung der Lernumgebung positiv zu beeinflussen und die Akzeptanz zu erhöhen. Überdies

wird ersichtlich, dass insbesondere die didaktische Gestaltung der Lernumgebung die Annahme erhöht. Weiterführende Untersuchungen mit Blick auf die Mediatoreffekte sollten daher einen tiefergehenden Einblick zur Klärung der kausalen Zusammenhänge liefern.

9.3.5 Mediatoreffekte

In diesem Abschnitt wird geprüft, ob der signifikante Zusammenhang zwischen der unabhängigen Variable *Einstellungen zu AR* und der abhängigen Variable *Akzeptanz* durch Aufnahme eines Mediators (nicht) erhalten bleibt. Bei Betrachtung der oben dargestellten Regressionsanalysen wird deutlich, dass die Beziehung zwischen unabhängiger und abhängiger Variable durch die Usability beeinflusst werden könnte. Die Durchführung der schrittweisen Regressionsanalyse mit der Kriteriumsvariable *Akzeptanz* und den Prädiktorvariablen *Individualisierbarkeit*, *Problemorientierte Didaktik*, *Voraussichtlicher Lernerfolg* sowie den *Einstellungen zu AR* offenbart, dass das Personenmerkmal aus dem Modell ausgeschlossen wurde (s. Tabelle 39).

Tabelle 39. Regressionsanalyse (schrittweise) für die Akzeptanz als Kriteriumsvariable und die Einstellungen zu AR, problemorientierte Didaktik, den voraussichtlichen Lernerfolg und die Individualisierbarkeit als Prädiktorvariablen (N = 122).

Prädiktoren	<i>B</i>	<i>Standardfehler</i>	<i>Beta</i>	<i>T</i>
Problemorientierte Didaktik	.373	.109	.344	3.425**
Voraussichtlicher Lernerfolg (SuS)	.259	.120	.226	2.157*
Individualisierbarkeit	.152	.072	.191	2.123*

$R^2_{\text{kor.}} = .415, F(3,111) = 27.941, p < .001$
 Anmerkung. *** $p < .001$, ** $p < .01$, * $p < .05$

Mit 41.5 % leistet das schrittweise Regressionsmodell aus Tabelle 39 einen sehr hohen Erklärungsbeitrag zur Varianz der Akzeptanz. Ferner erweckt es mit seinen durchweg signifikanten Werten bei den Usability-Variablen den Anschein einer vollständigen Mediation (vgl. Kapitel 8.6.5).

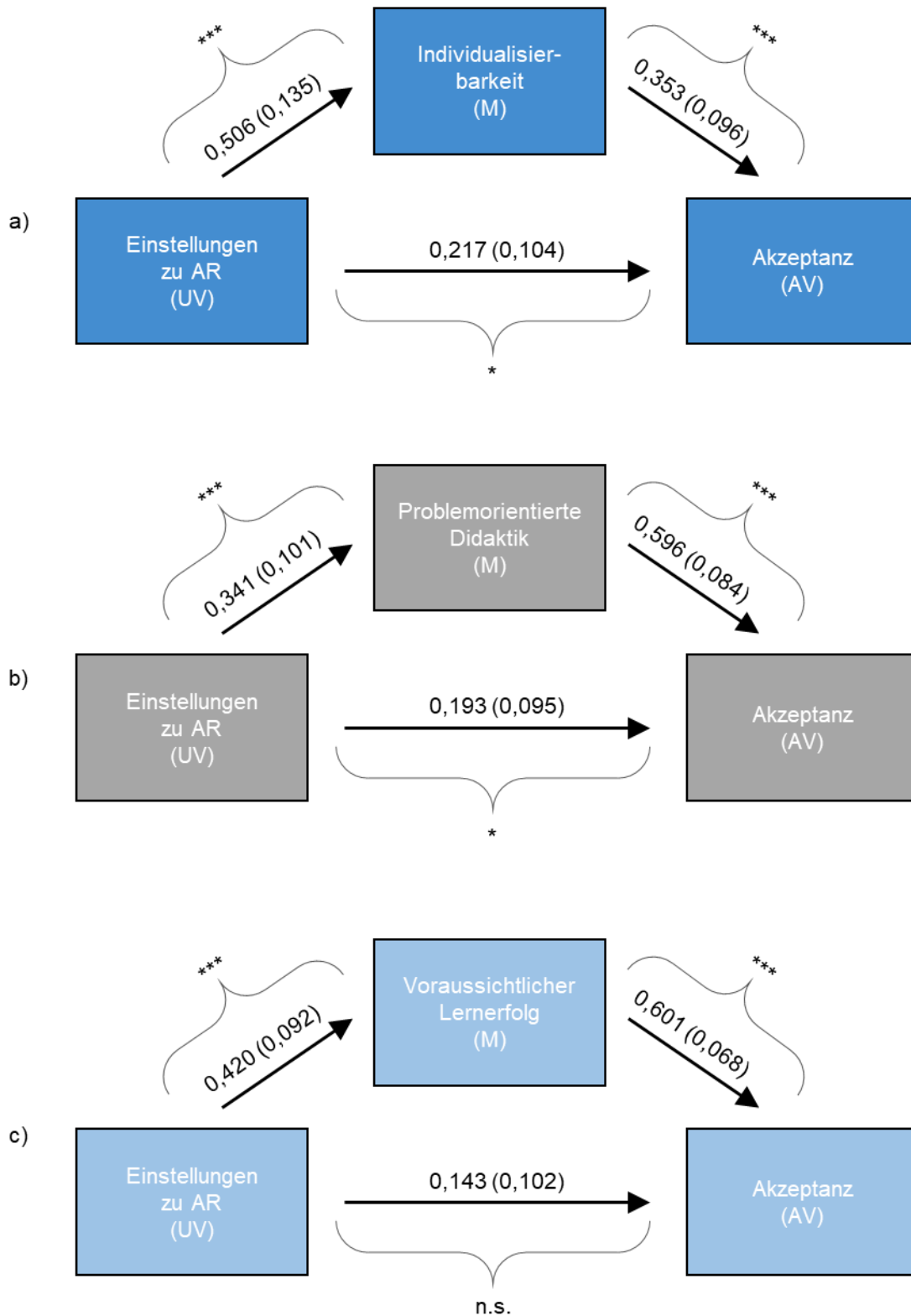


Abbildung 33. Zusammenfassung der Mediatoranalysen zur Überprüfung des Zusammenhangs zwischen den Einstellungen zu AR und der Akzeptanz mittels Modell a) Mediator: Individualisierbarkeit, b) Mediator: Problemorientierte Didaktik und c) Mediator: Voraussichtlicher Lernerfolg; angegeben sind über den Pfeilen $B (SE_B)$ sowie die zugehörigen Signifikanzniveaus mit *** $p < .001$, ** $p < .01$, * $p < .05$ und n.s. nicht signifikant.

Demnach wurden die Variablen *Individualisierbarkeit*, *Problemorientierte Didaktik* und *Voraussichtlicher Lernerfolg* auf Mediation untersucht. Der erste Schritt war in allen drei Mediationsanalysen identisch: Es wurde der totale Effekt zwischen der Prädiktorvariable *Einstellungen zu AR* und der Kriteriumsvariable *Akzeptanz* mit dem hoch signifikanten unstandardisierten Relationskoeffizient $B = .396$ und zugehörigem Standardfehler $SE_B = .108$ bestätigt. Im zweiten Schritt wurde der direkte Effekt zwischen der Prädiktor- und Mediatorvariable ermittelt. Demnach lagen im Zusammenhang mit den jeweiligen Mediatoren *Problemorientierte Didaktik* ($B = .341$, $SE_B = .101$), *Individualisierbarkeit* ($B = .506$, $SE_B = .135$) und *Voraussichtlicher Lernerfolg* ($B = .420$, $SE_B = .092$) stets hoch signifikante Ergebnisse vor. Dies wird in Abbildung 34 durch die dargestellten Modelle a) bis c) ersichtlich. Ferner gibt Abbildung 34 Aufschluss über die Wirkung des jeweiligen Mediators auf das Kriterium *Akzeptanz*, unter Kontrolle des direkten Einflusses von Prädiktor- auf Kriteriumsvariable (vgl. Schritt 3 in Kapitel 8.6.5). In allen drei Modellen sind die Zusammenhänge zwischen der Usability und der Akzeptanz hoch signifikant (*Individualisierbarkeit*: $B = .353$ mit $SE_B = .096$, *Problemorientierte Didaktik*: $B = .596$ mit $SE_B = .084$, *Voraussichtlicher Lernerfolg*: $B = .601$ mit $SE_B = .068$). Es wird jedoch deutlich, dass die Prädiktorwirkung der Variable *Einstellungen zu AR* stets sinkt und alle drei Modelle auf eine Mediatorwirkung der Usability-Variable hinweisen (vgl. Schritt 4 in Kapitel 8.6.5). Im Vergleich zu den Modellen mit den Mediatoren *Individualisierbarkeit* ($B = .217$, $SE_B = .104$) und *Problemorientierte Didaktik* ($B = .193$, $SE_B = .095$) verliert das Modell mit dem Mediator *Voraussichtlicher Lernerfolg* ($B = .143$, $SE_B = .102$) an Signifikanz. Wohingegen in den Modellen a) und b) ein partieller Effekt festgestellt wird zeigt das Modell c) mit der Mediatorvariable *Voraussichtlicher Lernerfolg* einen totalen Mediatoreffekt (vgl. Kapitel 8.6.5). Abgesichert wurden diese Ergebnisse durch eine Signifikanzprüfung des jeweiligen indirekten Effekts mittels Sobel-Test (Modell a zur *Individualisierbarkeit*: $z = 2.625$ und $p = .009$, Modell b zur *Problemorientierte Didaktik*: $z = 3.0487$ und $p = .002$ sowie Modell c zum *voraussichtlichen Lernerfolg*: $z = 4.056$ und $p = .000$). Ausgehend von dem totalen Effekt der *Einstellungen zu AR* auf die *Akzeptanz* können den Modellen a) bis c) folgende direkte Effekte entnommen werden:

- Modell a: 54.8 % (ca. 45 % der Wirkung werden über die Mediatorvariable *Individualisierbarkeit* vermittelt)
- Modell b: 48.7 % (ca. 51 % der Wirkung werden über die Mediatorvariable *Problemorientierte Didaktik* vermittelt)
- Modell c: 36.1 % (ca. 67 % der Wirkung werden über die Mediatorvariable *Voraussichtlicher Lernerfolg* vermittelt)

Die Vermutung einer vollständigen Mediation im Regressionsmodell mit allen unabhängigen Variablen (*Individualisierbarkeit*, *Problemorientierte Didaktik*, *Voraussichtlicher Lernerfolg* und *Einstellungen zu AR*) auf die *Akzeptanz* als Kriteriumsvariable (vgl. Tabelle 39) kann folglich nicht bestätigt werden. Vielmehr betonen die Ergebnisse, dass mehrere Mediatoren, d.h. drei

von der Anzahl, nebeneinander zu wirken scheinen. Die Prädiktorvariable *Einstellungen zu AR* beeinflusst also vermutlich vier Mediatoren, welche wiederum alle auf die Kriteriumsvariable Akzeptanz wirken.

9.4 Varianz- und Kovarianzanalyse

Auf Basis der Ergebnisse, die den Regressions- und Mediationsanalysen entsprungen sind (vgl. Kapitel 9.3), können die Mediator-Variablen *Individualisierbarkeit*, *Problemorientierte Didaktik* und *Voraussichtlicher Lernerfolg* als mögliche Störgrößen angesehen werden. Sie wurden bei der Untersuchung des Gruppeneffekts auf die Akzeptanz in das Modell mitaufgenommen, um ihren Einfluss auf die abhängige Variable zu kontrollieren.

Die Voraussetzungen zur Durchführung der AN(C)OVA wurden geprüft. Demnach lagen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen auf die jeweilige Kovariate vor. Die Homogenität der Regressionssteigungen wurde durch Bildung der entsprechenden Interaktionsterme getestet und war für alle Kovariaten gegeben ($p > .05$). Ferner wurden keine Ausreißer in den Usability-Skalen (beurteilt mittels Boxplots) diagnostiziert. Auch die Voraussetzung der Normalverteilung konnte nach visueller Sichtung der Quantil-Quantil-Diagramme erfüllt werden (vgl. Kapitel 8.6.1). Gemäß der Überprüfung mit dem Levene-Test (vgl. Tabelle A8 in Anhang) konnte zudem die Varianzhomogenität in allen Akzeptanz- und Usability-Skalen angenommen werden (z.B. Akzeptanz: $p = .402$).

9.4.1 Gruppenvergleich bezogen auf die Akzeptanz

Im Rahmen der Kovarianzanalyse wird auf die adjustierten Mittelwerte der Gruppen bezogen auf die Akzeptanz zurückgegriffen. Demnach wurden diese für den Einfluss der drei Kovariaten auf die Akzeptanz statistisch kontrolliert. Tabelle 40 demonstriert die unadjustierten und adjustierten Mittelwerte im Vergleich (s. auch Tabelle 28 aus Kapitel 9.1.2). In beiden Fällen wird deutlich, dass in der AR-Gruppe ein höherer Mittelwert (unadjustiert: $M = 2.51$, $SD = 0.43$; adjustiert: $M = 2.5$, $SD = 0.05$), als in den Gruppen Simulation (unadjustiert: $M = 2.37$, $SD = 0.38$, adjustiert: $M = 2.32$, $SD = 0.06$) und HMD-AR (unadjustiert: $M = 2.24$, $SD = 0.5$, adjustiert: $M = 2.3$, $SD = 0.05$) erzielt wurde. Ferner zeigen die um die Kovariaten beseitigten Standardabweichungen niedrige Streuungen (vgl. Tabelle 40) auf. Wird für die Individualisierbarkeit, problemorientierte Didaktik und den voraussichtlichen Lernerfolg kontrolliert, so zeigt sich, dass die AR-Lernumgebung die höchste Zufriedenheit bei den Probanden erreichte, wohingegen das HMD-AR-Setting am wenigsten angenommen wurde.

Tabelle 40. Deskriptive Statistik der drei Gruppen Simulation, AR und HMD-AR auf die Akzeptanz mit Stichprobengrößen (N), adjustierten sowie unadjustierten Mittelwerten (M) und Standardabweichungen (SD).

Gruppe	N	Unadjustiert		Adjustiert	
		M	SD	M	SD
Simulation	35	2.37	0.38	2.32	0.06
AR	46	2.51	0.43	2.5	0.05
HMD-AR	41	2.24	0.5	2.3	0.05

Ziel der Kovarianzanalyse war es zu untersuchen, ob sich die drei Gruppen nach Berücksichtigung der Usability-Variablen *Individualisierbarkeit*, *Problemorientierte Didaktik* und *Voraussichtlicher Lernerfolg* hinsichtlich der Akzeptanz unterscheiden. Nachdem die Kovariaten kontrolliert wurden, konnten statistisch signifikante Unterschiede mit $F(2,116) = 4.724$, $p = .011$, partielles $\eta^2 = .075$ für die verschiedenen Lernumgebungen aufgedeckt werden. Folglich sollten 7.5 % der Varianz in der abhängigen Variablen *Akzeptanz* mit der medialen Aufbereitung der App erklärt werden. Dies spricht für einen mittleren Effekt. Bei Betrachtung der Signifikanzwerte zeigt sich, dass die problemorientierte Didaktik mit $F(1,116) = 12.87$, $p < .01$, $\eta^2 = .10$ und der voraussichtliche Lernerfolg mit $F(1,116) = 5.41$, $p = .022$, $\eta^2 = .045$ die Akzeptanz signifikant vorhersagen. Die Kovariable *Individualisierbarkeit* demonstriert eine erste Tendenz für die Vorhersage der Akzeptanz, da $F(1,116) = 3.8$, $p = .054$, partielles $\eta^2 = .032$. Es kann schließlich davon ausgegangen werden, dass vor allem die problemorientierte Didaktik und der voraussichtlich Lernerfolg die Akzeptanz der Lernumgebung beeinflussen.

Nach Bereinigung um die drei Usability-Merkmale demonstrierte der Bonferroni-korrigierte Post-hoc-Test (s. Tabelle 41) einen signifikanten Unterschied zwischen der Annahme der AR- und der HMD-AR-Lernumgebung ($p = .029$, $M_{\text{Diff}} = 0.207$, 95 %-CI[0.029, 0.386]), jedoch nicht zwischen den Tablet-Gruppen ($p = .063$, $M_{\text{Diff}} = -0.178$, 95 %-CI[-0.363, 0.007]) oder zwischen der non-AR- und HMD-AR-Gruppe ($p > .999$, $M_{\text{Diff}} = -0.029$, 95 %-CI[-0.222, 0.164]).

Tabelle 41. Paarweiser Vergleich der Gruppen Simulation, AR und HMD-AR für die Variable *Akzeptanz* nach Bereinigung der Usability-Variablen; Mittelwertdifferenzen (M_{Diff}), Standardabweichungen (SD), Signifikanzniveaus (p) sowie Unter- und Obergrenzen des 95 %-Konfidenzintervalls (95 %-CI).

Paarweiser Gruppenvergleich		M_{Diff}	SD	p	95 % Konfidenzintervall für Differenz	
					Untergrenze	Obergrenze
Simulation	AR	-0.178	0.076	.063	-0.363	0.007
AR	HMD-AR	.207*	0.074	.017	0.029	0.386
HMD-AR	Simulation	-0.029	0.079	1.000	-0.222	0.164

Es wurde deutlich, dass die Akzeptanz in der AR-Gruppe signifikant höher als in der HMD-AR-Gruppe ausfällt. Die Effektstärke nach Cohen (1988) lag bei $f = .25$ und entsprach einem mittleren Effekt. Zwischen den Tablet-Gruppen per se sowie der non-AR- und der HMD-AR-Gruppe unterschied sich die Annahme der Lernanwendung jedoch nicht.

9.4.2 Gruppenvergleich bezogen auf die Usability

Die einfaktorielle Varianzanalyse zeigt statistisch signifikante Unterschiede in den drei Vergleichsgruppen hinsichtlich der Angemessenheit der Anforderungen ($F(2,119) = 3.294$, $p = 0.041$, $\eta^2 = .052$). Führt man einen paarweisen Vergleich mit der Bonferroni-Korrektur für die abhängige Variable *Angemessenheit der Anforderungen* durch, so zeigt sich, dass sich die Simulations-Gruppe ($M = 2.33$, $SD = 0.44$) signifikant ($p = .045$) von der HMD-AR-Gruppe ($M = 2.05$, $SD = 0.5$) unterscheidet (vgl. Tabelle 42). Die Effektstärke beträgt $f = .23$ und ist damit nach Cohen (1988) klein. Dieser Befund wird der Vollständigkeit halber angeführt, sollte aber mit größter Vorsicht interpretiert werden, da sich die non-AR- und HMD-AR-Gruppe aufgrund der Veränderung zweier Variablen prinzipiell nicht vergleichen lassen. Zwischen den Tablet-Gruppen untereinander sowie den beiden AR-gestützten Varianten werden keine signifikanten Interaktionen für die Angemessenheit der Anforderungen gefunden. Tabelle 42 deckt auf, dass die technische Bedienbarkeit eine erste Tendenz für einen Gruppenunterschied aufzeigt ($F(2,119) = 2.695$, $p = .072$, $\eta^2 = .043$). Überdies deckt die einfaktorielle Varianzanalyse weder bezüglich der Individualisierbarkeit ($F(2,119) = 1.922$, $p = .151$) noch bezüglich der problemorientierten Didaktik ($F(2,119) = 0.230$, $p = .795$) statistisch signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen mit Blick auf die Beurteilung der Lernumgebung auf. Ferner liegen keine signifikanten Gesamtmodelle für die Verständlichkeit ($F(2,119) = 0.732$, $p = .483$) und die Wirkung der Medien ($F(2,119) = 0.699$, $p = .499$) vor. Auch hinsichtlich der voraussichtlichen Motivation ($F(2,119) = 0.293$, $p = .747$) und dem voraussichtlichen Lernerfolg ($F(2,119) = 1.274$, $p = .283$) können keine statistisch signifikanten Unterschiede für die verschiedenen Lernumgebungen festgestellt werden.

Tabelle 42. Varianzanalytischer Gruppenvergleich mit den Gruppen Simulation ($N = 35$), AR ($N = 46$) und HMD-AR ($N = 41$) für die Usability-Variablen unter Angabe der Mittelwerte (M), Standardabweichungen (SD), F -Wert (F), Freiheitsgrade (df), Signifikanzniveaus (p) und der Effektstärke (f).

Variable	Simulation		AR		HMD-AR		F	df	p	f
	M	SD	M	SD	M	SD				
Angemessenheit der Anforderungen	2.33	0.44	2.24	0.50	2.05	0.50	3.294	2	.041	.23
Technische Bedienbarkeit	2.40	0.49	2.42	0.46	2.20	0.45	2.695	2	.072	.21
Problemorientierte Didaktik	2.44	0.37	2.40	0.44	2.37	0.43	0.230	2	.795	.06
Individualisierbarkeit	2.16	0.47	2.08	0.55	1.91	0.62	1.922	2	.151	.18
Verständlichkeit der Medien	2.36	0.39	2.36	0.33	2.28	0.33	0.732	2	.483	.11
Wirkung der Medien	2.38	0.39	2.38	0.44	2.28	0.45	0.699	2	.499	.11
Voraussichtliche Motivation	2.32	0.55	2.36	0.48	2.41	0.48	0.293	2	.747	.07
Voraussichtlicher Lernerfolg	2.26	0.31	2.21	0.47	2.12	0.37	1.274	2	.283	.15

Zusammenfassend unterscheiden sich die Gruppen in Hinblick auf die Angemessenheit der Anforderungen der Lernumgebung signifikant. Dabei ist der Unterschied auf die HMD-AR- und Simulations-Gruppe, welchen sehr gegensätzliche technische Lernarrangements und didakti-

sche Gestaltungsmöglichkeiten zugrunde liegen, zurückzuführen. Ferner liefert das Datenmaterial einen ersten Hinweis darauf, dass die technische Einschätzung Gruppenunterschiede bedingen kann. Daher scheint die Bewertung der Instruktionen, und vermutlich der technischen Funktionen, in den drei Gruppen *Simulation*, *AR* und *HMD-AR* unterschiedlich auszufallen.

10 Diskussion Hauptstudie 1

Nachstehend wird Hauptstudie 1 aus methodischer und inhaltlicher Sicht diskutiert. Die methodische Analyse fokussiert neben der Stichprobe die eingesetzten Messinstrumente. Ferner werden die Studiendurchführung sowie die Lernumgebungen kritisch betrachtet. Im Anschluss werden die Ergebnisse aus Hauptstudie 1 (vgl. Kapitel 9) mit Blick auf die Forschungsfragen und Hypothesen (vgl. Kapitel 5.2) inhaltlich diskutiert.

10.1 Methodische Diskussion

Mit dem übergeordneten Ziel die Wirksamkeit von AR auf das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis zu prüfen, wurden in Hauptstudie 1 Zusammenhangsanalysen für die Beantwortung der Fragestellungen aus Kapitel 5.2 durchgeführt. Hierfür wurden eine AR-Lernumgebung sowie zwei inhaltsgleiche Vergleichs-Settings (Simulations- und HMD-AR-Lernumgebung) konzipiert. Im Zuge der Vorstudie wurde die konzeptionelle Aufbereitung der AR-Lernumgebung pilotiert und erreichte überdurchschnittlich hohe Werte (vgl. Kapitel 7.1.2). Entsprechend sollte ihr Einsatz in Hauptstudie 1 (sowie in Hauptstudie 2), nach fachdidaktischer und insbesondere technischer Optimierung, bedenkenlos möglich sein. Nachdem AR als neuartiges Werkzeug komplex zu bedienen ist, mussten die Voreinstellungen (standardisierter Versuchsaufbau und geeignete Detektion des Markers) von der Projektleitung vorgenommen und die Probanden in das „Handling“ der Lernumgebung eingeführt werden. Ferner konnte die App, insbesondere auf der AR-Brille, nicht selbstständig über die Distanz von den Versuchspersonen aufgerufen und bedient werden, sodass eine Studiendurchführung in Präsenz mit fortlaufender Begleitung durch die Projektleitung zwingend notwendig war. Die Maßnahmen der Regierung zur Bekämpfung von Corona (z.B. Kontaktverbote) erschwerten die Rekrutierung der Lehrkräfte, da sämtliche Fortbildungsangebote lediglich im virtuellen Format angeboten und Schul- sowie Universitätsbesuche kaum gestattet wurden. Daher wurde eine nicht-probabilistische Stichprobenziehung mittels Schneeballverfahren durchgeführt (Döring & Bortz, 2016). Obgleich ihre Aussagekraft, im Vergleich zur probabilistischen Stichprobe, engere Grenzen aufweist (Döring & Bortz, 2016), war ihr Einsatz, aufgrund der erschwerten Bedingungen die Zielgruppe zu akquirieren, sinnvoll. Entsprechend wurden MINT-Lehrkräfte in einem allgemeinen Aufruf auf den sozialen Netzwerken wie Facebook, Twitter oder Instagram zur Teilnahme an der AR-Studie, unter strengster Berücksichtigung der Corona-Hygiene-Vorschriften (Impfnachweis, Maske tragen usw.), eingeladen. Dabei wurden, neben schulinternen und -übergreifenden Lehrerfortbildungen in kleinen Gruppen, auch individuelle Termine für die Studiendurchführungen in den Laborräumlichkeiten der TUM oder an der Schule, angeboten. Die Anzeigen wurden von interessierten Lehrkräften, vorrangig mit Unterrichtsfach Chemie, über Verlinkungen geteilt und an das Kollegium weitergeleitet. Ferner kam das Schneeballverfahren insbesondere bei bereits durchgeführten Studiendurchführungen zum Einsatz, da die Lehrkräfte häufig nach der Teilnahme weiteren potenziellen Kollegen davon berichteten und diese auf persönlichem

Wege von dem Angebot überzeugt wurden. Zahlreiche Rückmeldungen gingen ein und demonstrierten die hohe Motivation der Lehrkräfte. Sowohl die extrinsische Motivation als auch die Aufgeschlossenheit und das Interesse der Probanden innovative Unterrichtsszenarien kennenzulernen sollte sie animiert haben an der Studie teilzunehmen. Auf dieser Basis wurde die Stichprobe gezielt nach den Voraussetzungen der Lehrkräfte (Unterrichtsfach und Schulform) zusammengestellt, um eine größtmögliche Aussagekraft hinsichtlich der wissenschaftlichen Fragestellungen aus Kapitel 5.2 gewinnen zu können (Döring & Bortz, 2016). Insgesamt nahmen an der digitalen Vorbefragung zu den Einstellungen und Selbstwirksamkeitserwartungen hinsichtlich digitaler Medien und AR 157 MINT-Lehrkräfte teil. Der Fragebogen zur Akzeptanz und Usability von AR wurde von 122 Lehrkräften mit Unterrichtsfach Chemie ausgefüllt, wobei sich nur 115 Datensätze dem ersten Messzeitpunkt zuordnen ließen. Folglich wurde eine Abbruchquote von 26.6 % diagnostiziert, die vermutlich auf die Einschränkungen durch die Corona-Pandemie zurückgeführt werden kann. Der Schulalltag war einem schnelllebigen Wandel ausgesetzt, sodass Krankheitswellen und damit einhergehende Dienstaussfälle die Studiendurchführung immer wieder beeinträchtigten. Ferner ist nicht auszuschließen, dass der erhöhte Zeitaufwand (vgl. Studiendurchführung in Kapitel 8.5), verbunden mit dem Präsenztreffen, zu voreiligen Beendigungen der Studie führte. Letztlich kann mittels Abbruchquote auch erklärt werden, warum sich die Vergleichsgruppen unterschiedlich groß zusammensetzten (Sim: N = 33, AR: N = 43, HMD-AR: N = 39). In Hinblick auf die Zellenbesetzungen des Forschungsdesigns (vgl. Kapitel 8.2) ergeben sich durch die Stichprobengrößen zwischen den drei Lernumgebungen maximale Unterschiede von N = 10, die für eine gute Vergleichbarkeit sprechen. Die Lernumgebung enthält vier Lernpfade mit jeweils einer Anfangsaufgabe, die es mittels Rückgriff auf das Vorwissen zu lösen galt, und durchschnittlich fünf weiteren Teilaufgaben, die durch Abruf des Vorwissens und vor allen Dingen durch Nutzung der digitalen Lernumgebung beantwortet werden sollten. Mit einem zeitlichen Umfang von 30 Minuten war es durchaus denkbar alle Lernpfade gewissenhaft zu elaborieren. Traten jedoch technische Schwierigkeiten auf, wie das „Abstürzen“ der App o.ä., so verlängerte sich die Bearbeitungszeit oftmals um weitere 15 Minuten. Ferner war die technische Handhabung mit dem Tablet für Lehrkräfte mit niedrigen technologischen Vorerfahrungen oftmals herausfordernd (vgl. Knüsel Schäfer, 2020). Der Einsatz der HMD-AR-Technik war grundsätzlich an eine langwierige Einführung zur technischen Bedienung mit Kalibrierungsprozessen und Trainings zur Handhabung (z.B. Anklicken der virtuellen Objekte) gebunden, sodass die Arbeit mit dieser durchweg bei allen Probanden länger als in den anderen beiden Lernumgebungen dauerte. Entsprechend kann nicht ausgeschlossen werden, dass Ermüdungs- und Testlängeneffekte auftraten, die zur Demotivation der Probanden führten und die weiterführenden Testbearbeitungen, vor allem bei der HMD-AR-Gruppe, störten (vgl. Scheerer, 2021). Da die Probanden aber

eine hohe Innovationsbereitschaft zeigten, müssten diese Effekte prinzipiell geringer ausgefallen sein (Knüsel Schäfer, 2020; Thurlings et al., 2015). Die Offenheit für Neues kann als zeitstabile Konstante angesehen werden (Cobb-Clark & Schurer, 2012) und sollte demnach einen Motivationsabfall weitgehend vermeiden. Überdies wurde häufig registriert, dass einzelne Teilaufgaben unbeantwortet blieben oder sogar Lernpfade übersprungen wurden. Die Versuchspersonen wurden sodann darauf hingewiesen, wobei deren nachträgliche Bearbeitung tendenziell eher oberflächlich geschah. Eine Erklärung hierfür könnte sein, dass die freiwillige Teilnahme an der Studie für die Lehrkräfte mit keinerlei beruflichen Konsequenzen verbunden war und so zu nachlässigen Bearbeitungen führte. Schließlich ist auch zu berücksichtigen, dass einige Lehrkräfte bei der Elaboration mit der Lernumgebung unsicher in ihrem Verhalten waren. Aufgrund mangelnder Kenntnisse zu den Funktionen von AR gingen sie, trotz der einführenden Hinweise durch die Projektleitung, davon aus, der reale Versuchsablauf dürfe von außen nicht beeinflusst werden (z.B. Einschalten der Gleichspannungsquelle). Infolgedessen wurden die digitalen Teilchenprozesse zwar in der jeweiligen Lernumgebung aufgerufen, jedoch der reale Versuchsablauf auf Stoffebene nicht in Gang gesetzt. Das Potential der simultanen Verknüpfung von Stoff- und Teilchenebene, wie in Kapitel 5 beschrieben, wurde dann nicht ausgeschöpft. Dies wiederum könnte als negativer Nebeneffekt die Einschätzung der Usability manipuliert haben. Nachdem dieser Fall aber eher selten aufgetreten ist und die entsprechenden Ergebnisse keine Unterschiede zu den anderen Probanden aufzeigten, wird diese Möglichkeit gering eingeschätzt. Die beiden studienbegleitenden Befragungen fanden digital statt und wurden nicht von der Projektleitung geleitet. Es ist dementsprechend möglich, dass die Probanden die Fragebögen flüchtig ausfüllten und sich ohne ausreichend Tiefgang mit den Items beschäftigten. Des Weiteren stellte die Entwicklung der Fragebögen eine der größten Herausforderungen für die Datenerhebung dar. Zur Erfassung der Merkmale des Individuums und der Lernumgebung (vgl. FF1₁, FF2₁, FF3₁, FF4₁ in Kapitel 5.2) mussten sie die Gütekriterien der Validität und Reliabilität aufweisen. Zwar werden mittlerweile in der fachdidaktischen Forschung Usability-Befragungen immer häufiger durchgeführt, jedoch konnten zum damaligen Zeitpunkt keine geeigneten Messinstrumente gefunden werden, die AR und das Unterrichtsfach Chemie, exemplarisch zur Veranschaulichung von Teilchenprozessen, fokussierten. Das Forschungsdesiderat dieser Arbeit (= Untersuchung der Wirksamkeit von AR für den Chemieunterricht) zeigte sich mit der Konzentrierung auf das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis und den Umgang mit (M)ER bei realer Versuchsdurchführung sehr spezifisch. Daher musste ein passendes quantitatives Messinstrument zur Erfassung der Akzeptanz und Usability, welches das Denken in den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) vollständig abbildet, neu konstruiert werden (vgl. Kapitel 6.3.2). Überdies galt es auch den Fragebogen, mit welchen die Einstellungen und Selbstwirksamkeitserwartungen erhoben wurden, vor dem Hintergrund des TPACK-Modells (vgl. Kapitel 4.2.2) für die Triplet-Beziehung nach John-

stone (1993, 2000) am Beispiel Elektrolyse von Zinkiodid auszudifferenzieren. Bevor die Messinstrumente in Hauptstudie 1 eingesetzt werden konnten, wurden diese im Rahmen der Vorstudie (vgl. Kapitel 7.1) durch Itemanalysen und Skalenbildung mit zugehörigen Reliabilitätsanalysen validiert. Nach erfolgreicher Pilotierung erfolgte sodann deren Anpassungen bzw. Neuskalierungen. Entsprechend lieferte die Reliabilitätsanalyse aus Hauptstudie 1 hohe Werte, sodass die Reliabilität der Messinstrumente nachgewiesen werden konnte. Dabei wird angemerkt, dass drei (Sub-) Skalen weniger als 5 Items umfassen und daher in Hinblick auf ihre allgemeingültige Aussagekraft kritisch betrachtet werden sollten. Ferner wird betont, dass die Skalen keiner konfirmatorischen Faktorenanalyse zur Prüfung ihrer Gültigkeit unterzogen wurden. Nicht zu vergessen ist, dass die Akzeptanzforschung zwischen Einstellungs- und Verhaltensakzeptanz unterscheidet (Bürg, 2005; Venkatesh & Davis, 2000). In der vorliegenden Forschungsarbeit wurde sich bewusst auf erstere Ausprägung konzentriert. Es sollte jedoch mit Blick auf die tatsächliche Nutzung von innovativen Lehr- und Lernszenarien in weiteren Forschungen auch die Verhaltensakzeptanz untersucht werden.

10.2 Inhaltliche Diskussion

Mit Forschungsfrage **FF1**₁ soll geklärt werden, wie MINT-Lehrkräfte die Einsatzmöglichkeiten von digitalen Medien und Innovationen wie AR im MINT-Unterricht einschätzen (vgl. Kapitel 5.2). Die Ergebnisse aus Kapitel 9.1.1 demonstrieren, dass der Nutzen digitaler Medien von den MINT-Lehrkräften hoch eingeschätzt wurde. Mit Blick auf den Unterricht scheinen die Probanden den Einsatz digitaler Medien für pädagogische Zwecke etwas gewinnbringender als zur Förderung fachlicher und prozessbezogener Kompetenzen anzusehen. Insbesondere die Ergebnisse zu den Einstellungen im Allgemeinen, d.h. in Bezug auf die flächendeckende Digitalisierung an der Schule, lieferten hohe Werte. Entsprechend deutet das Datenmaterial darauf hin, dass die Lehrpersonen der digitalen Schulentwicklung sehr aufgeschlossen gegenüberstehen. In Anlehnung an Dinse de Salas (2019) kann abgeleitet werden, dass das Vorwissen über digitale Medien für schulische Zwecke sehr ausgeprägt war und daher im positiven Zusammenhang mit den Einstellungen stand. Jedoch weisen die in dieser Subskala erhöhten Standardabweichungen auf ein heterogenes Bild hin. Es kann folglich nicht ausgeschlossen werden, dass trotz des insgesamt positiven Eindrucks, einzelne Lehrpersonen die Möglichkeiten digitaler Medien geringer einstufen. Laut Aufenanger und Bastian (2019) stehen deutsche Lehrkräfte dem digitalen Wandel in Schule und Unterricht oftmals skeptisch gegenüber (vgl. Jimoyiannis & Komis, 2007; Krause & Eilks, 2015). In diesem Zusammenhang betont Waffner (2020) in ihrem Literaturreview *Unterrichtspraktiken, Erfahrungen und Einstellungen von Lehrpersonen zu digitalen Medien in der Schule*, welches 125 systematisch ermittelte Studien aus dem Zeitraum 2010 bis 2019 subsumiert, dass digitale Medien zwar im Berufsalltag etabliert sind, jedoch tendenziell die Funktion von Kommunikations- und Präsentationsmedien einnehmen. Dabei wird ihr Potential für digitalgestützte pädagogisch-didaktische

Unterrichtsformate kaum ausgeschöpft (vgl. auch Krause & Eilks, 2015; Fischer et al., 2015). Sowohl personale Aspekte, wie die intrinsische Motivation oder Extrovertiertheit der Lehrperson, als auch Rahmenbedingungen, wie Zeit und technische Ausstattung bzw. Unterstützung an der Schule, spielen eine essenzielle Rolle. Zudem haben die methodisch-technischen sowie pädagogisch-didaktischen Fähigkeiten der Lehrkräfte Einfluss auf den Medieneinsatz im Fachunterricht (Waffner, 2020). Da die pandemische Lage auch noch zu Beginn der Datenerhebungsphase zahlreiche Einschränkungen nach sich zog (z.B. *Home Schooling*) und die „digitale Revolution an den Schulen“ erst durch Corona nach und nach Einzug fand, ist es durchaus denkbar, dass manche Versuchspersonen den technischen Erneuerungen kritisch gegenüberstanden (vgl. Borukhovich-Weis et al., 2021). Entsprechend könnte sich die Stichprobe zweiteilen in Lehrkräfte, die...

1. den Mehrwert digitaler Medien für ihren Fachunterricht reflektierend ausnutzen und den Einsatz, beispielsweise auf Basis motivationaler Aspekte, vielversprechend ansehen.
2. digitale Medien herausfordernd betrachten, sich diesen aufgrund mangelnden Wissens nur schwer annehmen (wollen oder können) und folglich ihr Potential nicht erkennen.

Diese Stichprobenzweiteilung kristallisierte sich auch als Ergebnis einer Untersuchung zur Distanzlehre und den Einstellungen zur Digitalisierung bei Lehramtsstudierenden von Borukhovich-Weis et al. (2021) heraus. Da Forschungen zeigen, dass Lehrpersonen die digitalen Möglichkeiten der Unterrichts- und Schulgestaltung positiver als Lehramtsstudierende wahrnehmen (vgl. Aufenanger & Bastian, 2019), sollte es sich in der zweiten Gruppe um eine geringere Anzahl an Lehrkräfte handeln. Schließlich nahmen die Probanden freiwillig an der Datenerhebung teil und sollten größtenteils eine positive Grundeinstellung haben, wenn es um die digitale Unterrichtsgestaltung geht (vgl. Knüsel Schäfer, 2020; Waffner, 2020).

Die Nützlichkeit von Innovationen wie AR wurde zwar insgesamt positiv eingeschätzt, jedoch deuten die etwas niedrigeren Werte darauf hin, dass die Lehrpersonen der AR-Technik weniger als digitalen Medien im Allgemeinen aufgeschlossen waren. In einem sehr homogenen Bild wurde ersichtlich, dass die Lehrkräfte der AR-Technologie aus pädagogischer und fachdidaktischer Perspektive eine lernförderliche Wirkung zuweisen und den Nutzen der Innovation vor allem bezogen auf die digitale Schulentwicklung sehen. Diese Ergebnisse sind wenig verwunderlich. Da die Lehrkräfte die Teilnahme an der Datenerhebung selbst wählten und folglich eine hohe Innovationsbereitschaft zeigten, sollten sie an AR interessiert sein (vgl. Knüsel Schäfer, 2020) und wenigstens die Chance eines Potentials für den Fachunterricht sehen. Ferner handelt es sich bei der AR-Technik, insbesondere zum Zeitpunkt der Datenerhebung, um eine tendenziell wenig verbreitete Technologie. Die meisten der Probanden hatten zwar bereits digitale Medien in ihrem Fachunterricht eingesetzt, doch stützte sich die Studienteil-

nahme vorrangig auf der Motivation AR kennenlernen zu wollen. Außerdem kann die Stichprobe mit einem Durchschnittsalter von 31 bis 40 Jahren relativ heterogen angesehen werden. In Anlehnung an die Literatur ist es nicht auszuschließen, dass das Alter der Probanden negativ mit ihren Einstellungen korreliert (vgl. Dinse de Salas, 2019). Ähnlich wie bei Vogelsang et al. (2019) demonstrierte das Datenmaterial, dass die Versuchspersonen vorrangig Standardnutzungsformen digitaler Lehr- und Lernwerkzeuge (z.B. Lernvideos oder Text-Bild-Verarbeitungsprogramme wie „Microsoft PowerPoint“) privat und beruflich nutzten. Laut Angaben der Teilnehmenden liegen im Durchschnitt wenige bis kaum Berührungspunkte hinsichtlich des Einsatzes von AR im Chemieunterricht vor. Diese Daten stehen im Einklang mit den Ergebnissen von Vogelsang et al. (2019), die zeigen, dass angehende MINT-Lehrkräfte in ihrem Lehramtsstudium digitale Medien eher wenig in lernbezogenen Situationen genutzt haben und so gut wie keine lernbezogenen Vorerfahrungen mit AR haben. Insofern verwundert es nicht, dass in der vorliegenden Untersuchung die Einstellungen zu digitalen Medien stärker ausgeprägt als die Einstellungen zu AR waren. Laut Levin et al. (2013) oder Knüsel und Schäfer (2020) fußen Überzeugungen auf Erfahrungen. Auch die erfassten personenbezogenen Daten, wie Fortbildungsanzahl usw., spiegeln die wenigen Berührungspunkte der Lehrkräfte mit Innovationen wie AR für den Chemieunterricht wider. Da sowohl digitale Medien als auch AR durchweg Werte über dem mittleren Skalenniveau erreichten und die geringeren Einstufungen der Chancen von AR vermutlich auf die geringen Kenntnisse und den Neuheitsgrad von AR zurückzuführen sind (vgl. Knüsel Schäfer, 2020), kann Hypothese H1₁ angenommen werden. Folglich wird bestätigt, dass MINT-Lehrkräfte die Einsatzmöglichkeiten von digitalen Medien, einschließlich von Innovationen wie AR, für den MINT-Unterricht positiv einschätzen.

FF2₁ geht der Frage nach, wie MINT-Lehrkräfte ihre/n Fähigkeiten/Umgang hinsichtlich digitaler Medien und Innovationen wie AR einschätzen (vgl. Kapitel 5.2). Das Datenmaterial deckte auf, dass sie ihre eigenen Kompetenzen im Umgang mit herkömmlichen digitalen Anwendungen durchweg gut einschätzten, wobei die größte Unsicherheit im fachdidaktischen Einsatz diagnostiziert wurde. Im Verhältnis dazu stuften sie ihr Fähigkeitsselbstkonzept hinsichtlich der technisch-pädagogischen Möglichkeiten konservativer und auf rein technischer Ebene am höchsten ein. Dieses heterogene Ergebnis scheint plausibel zu sein, da die Identifikation der eigenen Kompetenzen zur Integration von digitalen Lernanwendungen im Fachunterricht sehr herausfordernd sein kann (vgl. Jong, 2021). Die Lehrpersonen zeigten sich sehr aufgeschlossenen digitalen Medien gegenüber. Auch die Einstellungen hinsichtlich digitaler Medien mit Fokus auf TPCK erreichten, wenn auch insgesamt etwas niedriger, durchaus hohe Werte (vgl. Waffner, 2020). Es ist daher denkbar, dass die Bewertungen der Einstellungen ähnliche Beurteilungen der Selbstwirksamkeitserwartungen nach sich ziehen. In einer Evaluationsstudie von Dinse de Salas (2019) wurden ca. 100 Lehrpersonen der Sekundarstufe zu ihren compu-

terbezogenen Einstellungen und Selbstwirksamkeitserwartungen befragt. Es wurde festgestellt, dass die Erfahrung hinsichtlich des Medieneinsatzes im Fachunterricht signifikant positiv mit der Selbstwirksamkeit hinsichtlich digitaler Medien im Unterricht korrelierte. Da der Fachunterricht in dem Zeitraum der Befragung mit sehr vielen plötzlichen digitalen Erneuerungen konfrontiert wurde und den Lehrkräften fortlaufend neue, meist unbekannte, Möglichkeiten der digitalen Unterrichtsgestaltung unterbreitet wurden (vgl. Krause & Eilks, 2015; Tappe, 2019), entspricht es den Erwartungen, dass sie ihre technischen Fähigkeiten mit Blick auf die Fachdidaktik und Pädagogik geringer einstufen. Entsprechend scheint es sich bei den medienbezogenen Kompetenzen eher um allgemein manifestierte technische Fähigkeiten zu handeln, die weniger auf unterrichtspraxisbezogene Veränderungen abzielen und vermutlich deswegen positiver eingestuft wurden (Jong, 2021; Waffner, 2020). Nachdem die Ergebnisse zu den technischen Kompetenzen im Umgang mit digitalen Medien am größten streuten, wird auf eine etwas heterogenere Beurteilung geschlossen. Dies könnte sich dadurch erklären lassen, dass Lehrkräfte trotz einer positiven Haltung digitale Medien einsetzen zu wollen, dies aufgrund von Versagensängsten seltener machen (vgl. Sieve et al., 2014). Demnach besaßen sie geringere Erfahrungswerte, die wiederum ihre objektive Einschätzung der eigenen medienbezogenen Fähig- und Fertigkeiten beeinflusste (vgl. Knüsel Schäfer, 2020; Krause & Eilks, 2015). Auch wenn derartige Fälle nicht auszuschließen sind, deutet das Datenmaterial der deskriptiven Analysen sichtlich darauf hin, dass sich unter den Probanden tendenziell sehr wenige Lehrkräfte mit geringen Vorkenntnissen hinsichtlich der Digitalisierung von Schule und Unterricht fanden (vgl. Dinse de Salas, 2019). Folglich kann Hypothese H2.1₁, dass MINT-Lehrkräfte ihre/n Fähigkeiten/Umgang hinsichtlich digitaler Medien hoch einschätzen, bestätigt werden.

Die Ergebnisse zu den Selbstwirksamkeitserwartungen hinsichtlich AR lieferten erwartungsgemäß niedrigere Einstufungen, die aber trotz des Neuheitsgrads der Innovation ausgeprägt und tendenziell nahe dem mittleren Skalenniveau lagen. Die personenbezogenen Begleitdaten offenbarten, dass eine gewisse Anzahl an Lehrkräften durchaus Erfahrungen mit AR im unterrichtsfachbezogenen Kontext hatte. Nachdem es sich dabei um eine sehr überschaubare Anzahl an Versuchspersonen handelte und die erhöhten Standardabweichungen auf sichtlich hohe Streuungen hinweisen, sollten diese Ergebnisse kritisch reflektiert werden. Sowohl die digitale Vorbefragung als auch die Versuchsbeobachtungen der Probanden geben Grund zu der Annahme, dass die Lehrkräfte äußerst geringe Vorerfahrungen hinsichtlich AR besaßen. Die erfolgreiche Implementation digitaler Medien in den Fachunterricht hängt von der Haltung der Lehrkräfte ab (Krause & Eilks, 2015). Da Lehrkräfte den Innovationen wie AR im Zuge der Befragung ein mäßiges bis leicht angehobenes Potenzial für den schulischen Praxiseinsatz zugewiesen haben, wird ersichtlich, dass sie diese bis dato nahezu kaum im Unterricht nutzten und folglich keine Erfahrungen mit ihnen besitzen konnten. Entsprechend ist nicht auszuschlie-

ßen, dass es sich um weniger kompetente Lehrpersonen, gegebenenfalls sogar mit Fehlvorstellungen, hinsichtlich innovativer Technologien handelte (vgl. Scheiter, 2021). Studienergebnisse wie jene von Aufenanger und Bastian (2019) decken die Defizite hinsichtlich medienbezogener Kompetenzen von Lehrkräften auf. Beispielsweise schreiben Lehrpersonen digitalen Medien vorrangig ein hohes Potential für die Einzelarbeit zu, wobei gerade ihre sozial-kommunikativen Faktoren kooperatives sowie interaktives Lernen (z.B. Kollaboration) fördern. In den vorangehenden Gesprächen zur Akquirierung der Lehrkräfte sowie in den Präsenztreffen (vgl. Hauptstudie 2 in Kapitel 11.5) kristallisierte sich heraus, dass die Versuchspersonen AR oftmals in zu enge Verbindung mit VR setzten (vgl. Kapitel 4.4) und die Technologie ungenau bzw. unvollständig oder fehlerbehaftet definieren konnten (z.B. als „*Animationen oder 3D-Modell*“ – Proband 91, bayerische Chemielehrkraft einer FOS). Ferner hielten manche der Probanden „einfache“ digitale Lernanwendungen (z.B. eBook) für Innovationen. Nachdem sich unter den 157 Befragten lediglich 16 Lehrkräfte fanden, die bereits an Fortbildungen zu Innovationen wie AR oder VR teilgenommen haben, wird der geringere Bekanntheitsgrad der Technologie untermauert. Zudem gaben nur 14 Lehrpersonen an, AR in ihrem Unterricht bereits verwendet zu haben, wovon lediglich fünf Personen AR gelegentlich privat nutzen (z.B. zur Unterhaltung). Es ist demnach offensichtlich, dass das Wissen zu High-End-Technologien, insbesondere vor dem Hintergrund des lernwirksamen Unterrichtseinsatzes, sehr gering war (Knüsel Schäfer, 2020; Mishra & Köhler, 2007). Zwar wurden mit den Selbstwirksamkeitstestungen keine Wissensabfragen durchgeführt, sie korrelieren aber tendenziell miteinander (Dinse de Salas, 2019). Entsprechend könnte erklärt werden, dass der hohe Grad an Unbekanntheit sowie fehlendes mediendidaktisches Wissen (vgl. Knüsel Schäfer, 2020), aufgrund mangelnder Erfahrungswerte, die Beurteilung der Selbstwirksamkeitserwartungen beeinflussten (vgl. Graham et al., 2009; Krause & Eilks, 2015). Die Expertise von MINT-Lehrkräften im Bereich AR ist folglich, mit einem Messwert unter dem mittleren Skalenniveau, nur schwach ausgeprägt. Dennoch verwundern die Daten, da vor allem auf Basis der personenbezogenen Daten (= geringe Vorerfahrungen mit AR), deutlich niedrigere Werte hinsichtlich der Selbstwirksamkeit zu AR erwartet wurden. Demzufolge kann Hypothese H2.2₁ nur bedingt konstatiert werden. MINT-Lehrkräfte schätzten ihre/n Fähigkeiten/Umgang hinsichtlich Innovationen wie AR niedriger als mit herkömmlichen digitalen Medien ein. Dabei ist nicht auszuschließen, dass sich die Probanden hinsichtlich ihrer Selbstwirksamkeit, vor allem aufgrund internaler Faktoren, überschätzten. Fallen motivationale Merkmale in Form von Technikinteresse oder Persönlichkeitsmerkmalen, z.B. Offenheit für Neues, hoch aus (vgl. Knüsel Schäfer, 2020), so könnte sich dies durchaus auf die Selbstwirksamkeitserwartung ausgewirkt haben. Es sollten sich daher Wissenstests bezüglich des Umgangs mit AR anschließen. Sie können einen tie-

fergehenden Einblick in die tatsächlichen Kompetenzen, bezogen auf das TPACK-Modell, geben und als Indikator für die Einschätzung der Selbstwirksamkeit dienen (vgl. Knüsel Schäfer, 2020).

Forschungsfrage **FF3₁** zielt darauf ab, wie Chemielehrkräfte die Usability der AR-Lernumgebung einschätzen (vgl. Kapitel 5.2). Die Ergebnisse zeigen mit deutlich über dem mittleren Skalenniveau liegenden Werten, dass die Chemielehrkräfte die drei digitalen Lernumgebungen durchweg positiv einschätzten. Laut Bürg und Mandl (2005) deuten hohe Werte der eingeschätzten Merkmale der Lernumgebung darauf hin, dass die didaktischen medialen Gestaltungskriterien der Lernumgebungen sehr gut umgesetzt wurden. Die Ergebnisse demonstrieren, dass die konzeptionelle Aufbereitung der Lernanwendung zur Elektrolyse von Zinkiodid vielversprechend angesehen wurde (vgl. Kopp et al., 2003), was wiederum auf eine gute Umsetzung der medialen, funktionalen, methodischen und didaktischen Gestaltung der Lernumgebung spricht. Des Weiteren ergibt sich aus den Beurteilungen, dass aus fachdidaktisch-konzeptioneller Perspektive sowie in Hinblick auf das User Interface eine benutzerfreundliche Lernumgebung konstruiert wurde (vgl. Figl, 2010). Die positive Einschätzung der methodischen und didaktischen Aufbereitung der Lernumgebung durch Fachlehrkräfte betont zum einen ihr Potential für den Einsatz im Fachunterricht und stellt zum anderen eine notwendige Voraussetzung für die effektive Untersuchung ihrer Lernwirksamkeit zur Förderung des Stoff-Teilchen-Konzeptverständnisses dar. Angesichts des Schultransfers sollte aber darauf geachtet werden, dass sich die Anforderungen der Aufgaben aus der Lernumgebung an den Präkonzepten der Schüler orientieren und derart angepasst werden (vgl. Eichelmann et al., 2012). Trotz der positiven Usability-Werte stellt sich dennoch die Frage, warum die Einschätzungen relativ heterogen waren und nicht „besser“ ausfielen. Neben den persönlichen Faktoren der Probanden könnte der Mangel an Authentizität der Lernumgebung einen Lösungsansatz darstellen. Die Elektrolyse von Zinkiodid ist ein im schulischen Kontext allseits bekannter Schülerversuch. Im Rahmen der Studie wurde das Ziel verfolgt das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis bei Lehrpersonen mit eben jener Lernumgebung zu fördern. Dabei stellte das Setting fachlich keine Herausforderung dar (vgl. Kapitel 6.4 und 8.3). Dieser Aspekt könnte einen entscheidenden Einfluss auf die Bewertung der Usability gehabt haben, beispielsweise wenn die Lehrkräfte den Sinn der Elaboration mit der App nicht erkennen und ihre Anforderung falsch einschätzen. Die Studienbeobachtungen deckten in wenigen Fällen auf, dass manche Probanden die Grundhaltung hatten „lediglich eine App zu testen“. Trotz ausführlicher Erklärungen zur Studiendurchführung ist nicht auszuschließen, dass einige Lehrkräfte das Forschungsziel nicht verstanden hatten und daher mit einer anderen Intention elaborierten. Dies könnte die Beurteilung maßgeblich beeinflusst haben. Entsprechend muss in zukünftigen Datenerhebungen mehr darauf geachtet werden, dass die Lehrkräfte die intendierten Funktionalitäten der AR-Lehr- und Lernanwendung sowie ihre adressierbaren Lernziele erkennen (vgl. Lauer &

Peschel, 2023). Die Ziele sollten nicht nur genannt, sondern transparent gemacht werden und einen klaren Bezug zum Anwendungsgebiet, d.h. der Professionswissenserweiterung von Lehrkräften, aufweisen (vgl. Kopp et al., 2003). Obgleich die Individualisierbarkeit am niedrigsten eingestuft wurde, weist diese Ausprägung auch die größte Streuung auf. Da diese Skala nur vier Items mit einer niedrigen Reliabilität besitzt, muss das Resultat sehr vorsichtig interpretiert werden (vgl. Döring & Bortz, 2016). Letztlich ist aber zu erwähnen, dass dieses Ergebnis zu erwarten war. Zwar konnten die Probanden Hilfen aufrufen und im Allgemeinen selbst entscheiden, welche Informationen in Form von augmentierten (M)ER sie aufrufen möchten, jedoch war die Bearbeitung der vier Lernpfade strikt an die Versuchsdurchführung geknüpft. Entsprechend fordert das AR-Setting einen standardisierten Versuchsaufbau, der nur wenig Spielraum für selbstgesteuerte Interaktionen mit den realen Objekten erlaubte (vgl. Kapitel 6.4). Da die Lernumgebung für Forschungszwecke bei Lehrkräften eingesetzt wurde, die durch die Bearbeitung nicht ihr prozessbezogenes, sondern ihr chemie- und mediendidaktisches Wissen hinsichtlich des Umgangs mit Stoff- und Teilchenebene erweitern sollten, rückte die Individualisierbarkeit eher in den Hintergrund. Folglich mussten die vier Lernpfade chronologisch abgearbeitet werden. Die Inhalte stützten sich größtenteils auf Veranschaulichungen, die visuell beobachtet wurden, nur wenige zusätzliche gestützte Hilfen bereitstellten und kaum Veränderungen durch die Lehrperson erlaubten. Geradezu diese Interaktionen zwischen dem Nutzer und dem digitalen Lernmaterial können aber durchaus von großer Bedeutsamkeit für den Lernprozess sein (vgl. Karapanos et al., 2018) und stellen daher ein wesentliches Merkmal kognitionsadäquater digitaler Lernutensilien dar. Gegebenenfalls bietet ein anderer Versuch oder ein chemisches Experiment die Möglichkeit einer vielfältigeren konzeptuellen Aufmachung von AR, die mehr auf die Interaktion zwischen realer und virtueller Welt abzielt (vgl. Azuma, 1997). Der Fokus könnte dann stärker auf dem Experimentieren und der Variablenkontrolle liegen, indem neben den Geschwindigkeitsänderungen der Teilchenprozesse, weitere Möglichkeiten zum Eingreifen in den realen Versuchsaufbau eingebettet werden (Frank et al., 2021). Dies könnte aus Perspektive des naturwissenschaftlichen Arbeitens die Erkenntnisgewinnung unterstützen (vgl. Huwer et al., 2019). Zwar wurde bewusst ein Versuch, wie die Elektrolyse, gewählt, der wenig Eingriffe von außen erfordert, jedoch könnte gerade dieser Aspekt eine Schlüsselfunktion für den Wissensaufbau zur Stoff- und Teilchenebene und damit für die Bewertung des Lernsettings einnehmen. Schließlich sollte geradezu diese Stärke der AR-Technik, die in der Interaktivität liegt (vgl. Azuma, 1997; Dunleavy & Dede, 2014), ausgeschöpft werden. Entsprechend müsste in Betracht gezogen werden, die Lernumgebung auf ein experimentell „aufwändigeres“ Setting zu übertragen. Vermutlich wirkte sich die strenggeleitete AR-gestützte Versuchsdurchführung mit ihren Lernpfaden (vgl. Funktionenbaum in Kapitel 8.3.1) negativ auf die Beurteilung der Individualisierbarkeit aus. Zum Zwecke des

selbstregulierten Lernens wäre es denkbar, individualisierte Feedbackoptionen und Interaktionsmöglichkeiten wie kurze Quiz-Abfragen zur Überwindung von Wissenslücken in das Setting zu integrieren (Bannert, 2009; Dunleavy & Dede, 2014; Lauer & Peschel, 2021; Scheiter, 2021). Überdies könnten ergänzend Tonspuren eingebunden werden, die via auditiven Kanal das multimediale Lernen nach Mayer (2014) fördern und mehr Spielraum zur selbstgesteuerten Verarbeitung kognitiver Arbeitsprozesse geben. Dies gilt vor allem bei Übertrag des Lernarrangements auf eine Schülervariante zu berücksichtigen. Die Angemessenheit der Anforderungen und voraussichtliche Motivation der Lernumgebungen wurden sehr hoch eingestuft, deuten aber aufgrund der erhöhten Standardabweichungen auf eine heterogene Einschätzung hin. Die Ausreißer bezogen auf die voraussichtliche Motivation der Lernenden sind schwer nachzuvollziehen, da das Konzept im Durchschnitt, insbesondere in Hinblick auf die problemorientierte Didaktik, sehr erfolgsversprechend eingeschätzt wurde. Entsprechend scheinen die fachdidaktischen Charakteristika wie die Einbindung der „Super-Lupe“, die Hinweise zum Modellcharakter usw., welche auf Basis der Pilotierung angepasst wurden (vgl. Kapitel 7.2.2), Anklang gefunden zu haben. Ferner kann aus den positiven Bewertungen der Verständlichkeit und Wirkung der Medien geschlossen werden, dass die Teilchenmodellierungen lernförderlich in das Setting implementiert wurden. Da das Merkmal *Angemessenheit der Anforderungen* eng verzahnt mit der Individualisierbarkeit ist, sollte dieser Befund wenig verwundern. Die positive Beurteilung deutet darauf hin, dass es sich um kognitiv aktivierende Lernaufgaben handelte, die die Lehrpersonen aufforderten, ihr elaboriertes Wissen in externen Repräsentationen per Lautem Denken aufzubereiten (vgl. Chi & Wylie, 2014; Fiorella & Mayer, 2021). Dennoch waren die Instruktionen der Lernumgebung scheinbar des Öfteren komplex, sodass die Probanden Schwierigkeiten hatten, diese hinsichtlich der korrekten Reihenfolge abzuarbeiten. Einerseits wurden gewisse Bereiche der Lernpfade übersehen oder „überflogen“ (z.B. Lesen der Einführung oder konkrete Wahl der Auswahloptionen), was vor allem bei dem Medium AR-Brille zum Vorschein kam. Die einfaktorielle Varianzanalyse untermauert diesen Befund mit statistisch signifikanten Unterschieden in den drei Vergleichsgruppen, die insbesondere auf die Simulations- und HMD-AR-Gruppe mit einer kleinen Effektstärke zurückzuführen waren. Entsprechend scheinen sich diese beiden Settings als Kontroverse (herkömmliche Technologie vs. High-End-Technologie) mit Blick auf die Anforderungen während der Elaboration am stärksten voneinander abzugrenzen. Letztlich verwundert dieses Ergebnis nicht, sollte aber mit großer Vorsicht interpretiert werden. Der Vergleich zwischen non-AR- und HMD-AR-Lernumgebung ist nur schwer anzustellen, da zwei Variablen verändert wurden (s. auch Kapitel 11.6.2). Folglich unterscheiden sich die beiden Settings nicht nur hinsichtlich der instruktionalen Gestaltung (digitale (M)ER vs. AR-(M)ER), der Medienwechsel (Tablet vs. AR-Brille) sorgt für Unterschiede in der Interaktivität. Andererseits könnte ein Testlängeneffekt eingetreten sein, der die Bearbeitung insgesamt beeinflusste und infolgedessen zu einer oberflächlichen

und unsicheren Bearbeitung führte und auf deren Basis sich negativere Einschätzungen anschlossen (s.o. Kapitel 10.1). Erwartungsgemäß demonstrierte die deskriptive Analyse, dass die Usability in jeder der drei Lernumgebungen (Simulation, AR und HMD-AR) positiv eingeschätzt wurde. Die simulations- und AR-basierte Lernumgebung wurden sehr ähnlich bewertet. Angesichts der technischen Herausforderungen, die mit der Verwendung der HMD-AR-Technik einhergingen (Scheerer, 2021), überrascht es wenig, dass die High-End-Technologie die niedrigsten Werte mit den höchsten Streuungen erzielte. Wie vermutet ist die oben beschriebene Einschätzung der Individualisierbarkeit der Lernumgebung auf die Beurteilungen der HMD-AR-Gruppe zurückzuführen. Der Handlungsspielraum selbstgesteuert mit einer AR-Brille zu arbeiten, wurde sichtlich geringer eingestuft als bei den anderen beiden Anwendungen. Schließlich sollte sich dieser Befund mithilfe des Neuheitsgrads der High-End-Technologie erklären lassen. Die Unbekanntheit von AR-Brillen hinsichtlich ihrer Funktionen und die damit einhergehenden Schwierigkeiten im Umgang mit diesen scheinen sich, widererwartend, aber im Einklang mit aktuellen Forschungen von Buchner et al. (2021), maßgeblich auf die Bewertung niedergeschlagen zu haben. In Übereinstimmung mit den Befunden von Lauer und Peschel (2023) oder Buchner und Zumbach (2020) wird der Anschein erweckt, dass AR-Brillen größtenteils junge Lernende zum Lernen im Fach motivieren können. Im Vergleich dazu wurde das Potential von simulationsbasierten Lernumgebungen zur Motivationsförderung, mit entsprechend hohen Standardabweichungen, am niedrigsten eingestuft. Demnach scheint die Innovation AR, womöglich aufgrund ihres Neuheitsgrads, ein hohes Interesse bei den Lehrpersonen zu erwecken. Das Ergebnis der Simulations-Gruppe deutet in diesem Zusammenhang auf eine heterogenere Gruppe hin, die sich durch das Alter und den ambivalenten Einstellungen zu digitalen Medien (vgl. Borukhovich-Weis et al., 2021; Knüsel Schäfer, 2020) erklären lassen könnte. Da die Probanden der Simulations-Gruppe gezielt an der Studie teilnahmen, um AR kennenzulernen, und sich dann im Zuge der Durchführung „nur“ mit einer non-AR-Lernumgebung auseinandersetzten, könnte ein Nebeneffekt sein, der zu einer Demotivation der Probanden führte und die Ergebnisse beeinflusste. Dennoch deutet das Datenmaterial auf den Trend hin, dass die non-AR-Variante in einem sehr homogenen Bild etwas besser als die AR-Lernumgebung auf dem Tablet bewertet wurde. Demnach sollte der genannte Effekt einer Demotivation marginal ausfallen. Dabei ist anzumerken, dass die AR-Gruppe die höchsten Werte in der Ausprägung *Technische Bedienbarkeit* aufzeigte. Angesichts dessen lieferte die Varianzanalyse eine erste Tendenz für einen Gruppenunterschied. Des Öfteren wurden die Herausforderungen im Umgang mit der HMD-AR-Technik erwähnt (vgl. Kapitel 4.4), die einen sichtlichen Optimierungsbedarf fordern (Scheerer, 2021). Sie bieten demzufolge eine Erklärung für die deutlich negativere Beurteilung der Usability der High-End-Technologie. Da die AR-Lernumgebung auf dem Tablet tendenziell mehr Vertrautheit mit der Technik und, wenigstens im ersten Moment, verstärkte Faszination erweckte, sollte die technische Bedienung

weniger Schwierigkeiten nach sich gezogen haben. Die Verwunderungen bei der Bearbeitung der non-AR-Variante mit ihren häufigen Nachfragen zur Elaboration könnte sich negativ auf die Einschätzung der technischen Bedienbarkeit ausgewirkt haben. Ein Erklärungsansatz wäre die entstehende „Langeweile an der einfachen Anwendung“ oder die „Frustration AR noch nicht kennengelernt zu haben“. Bearbeitungen des Layouts und der Navigation könnten Abhilfe schaffen und die Bedienung der Lernumgebungen unterstützen. Die einfaktorielle Varianzanalyse deckte bezüglich der Individualisierbarkeit, der problemorientierten Didaktik, der Verständlichkeit, der Wirkung der Medien sowie der voraussichtlichen Motivation und dem voraussichtlichen Lernerfolg keine statistisch signifikanten Unterschiede für die verschiedenen Lernumgebungen auf. Entsprechend schätzten die Chemielehrkräfte das (inhaltsgleiche) Konzept der Lernumgebungen insgesamt sehr positiv ein. Entgegen den Ergebnissen von Lauer und Peschel (2023) scheinen die Lehrpersonen das pädagogisch- und fachdidaktische Potential von AR erkannt zu haben. Folgender Trend hinsichtlich des Potentials der Lernumgebungen für den Chemieunterricht zeichnet sich ab:

HMD-AR-Setting (AR-Brille) < AR-Setting (Tablet) < Simulations-Setting (Tablet)

Die non-AR-Lernumgebung wurde am effizientesten und die HMD-AR-Lernumgebung auf der AR-Brille am wenigsten lernförderlich eingestuft. Es deutet sich an, dass sich die verschiedenen (non-) AR-gestützten Lernarrangements für die Lehrpersonen unterschiedlich eignen. An welchen personellen Eigenschaften dies festgemacht werden kann, muss weiter untersucht werden. Es wird angeführt, dass es sich um kleine Gruppenunterschiede handelt. Die AR-Anwendung auf dem Tablet liegt hinsichtlich ihrer Stärken für den Chemieunterricht dazwischen. Die erhöhten Standardabweichungen, die mit den Beurteilungen der HMD-AR-Gruppe einhergingen, lassen auf eine erhöhte Heterogenität in der Gruppe schließen und könnten im Sinne der Aufgeschlossenheit gegenüber Innovationen durch die Einstellungen erklärt werden (s.o. Beantwortung von FF1₁). Auch die Studie von Lauer und Peschel (2023) verweist auf geteilte Meinungsbilder, wenn es um den Mehrwert von AR für den (Sach-) Unterricht geht. Unter den Befragten fanden sich vermutlich höchst aufgeschlossene Lehrpersonen, welche die simultane Verknüpfung von Stoff- und Teilchenebene bei realer Versuchsdurchführung sehr positiv betrachteten und die Möglichkeiten der AR-Technologie für die kognitive Aktivierung von Schülern positiv einschätzten (Scheiter, 2021). Dennoch deuten die Studienbeobachtungen auch auf Skepsis einiger Lehrpersonen hin. Das Alter könnte hierfür als Begründung angeführt werden. Nach Aufenanger und Bastian (2019) schätzen Lehramtsstudierende die Möglichkeiten digitale Medien lernwirksam in den Fachunterricht zu integrieren geringer als Lehrpersonen ein. Dies spräche für eine Diskrepanz, bedingt durch das Alter, welche in ähnlichem Maße in der vorliegenden Studie zum Vorschein kam. Junge Lehrpersonen, die sich noch im Referendariat befanden, kritisierten vor, während und nach der Studiendurchführung häufiger AR und die Chancen für das erfolgreiche Lernen im Fach Chemie. Entsprechend

scheinen sie die Anwendung weniger angenommen zu haben (vgl. FF4₁), was sich wiederum auf die Beurteilung der Usability auswirkte. Dieser Eindruck stützt sich zwar nicht auf fundierten Ergebnissen, kann aber als erster Hinweis angesehen werden, um in Anschlussstudien näher untersucht zu werden (vgl. Zusammenhangsanalysen und FF6₁). Insgesamt ist festzuhalten, dass Hypothese H3₁ bedingt bestätigt werden kann. Zwar schätzten die Chemielehrkräfte die AR-Lernumgebung insgesamt positiv ein, jedoch wurde die HMD-AR-Lernumgebung nicht positiver als die AR-gestützte Variante auf dem Tablet bewertet. In Hinblick auf eine nachhaltige Nutzung von AR-Lernumgebungen für Lehrerfortbildungen ist es sicherlich empfehlenswert, alle drei Lernumgebungen vor dem Hintergrund der oben erläuterten Aspekte zu modifizieren.

FF4₁ stützt sich auf der Frage, inwieweit die AR-Lernumgebung von Chemielehrkräften akzeptiert wird (vgl. Kapitel 5.2). Die Ergebnisse der Skala *Akzeptanz* lassen darauf schließen, dass die MINT-Lehrkräfte das Konzept der inhaltlichen Aufbereitung der Lernumgebung sehr annehmen und sich vielversprechende Lernmöglichkeiten für die Weiterbildung eines nachhaltigen, adäquaten Stoff-Teilchen-Konzeptverständnisses mittels AR offenbaren können (vgl. Kopp et al., 2003; Schallehn, 2004). Die deskriptive Analyse lieferte nicht nur beachtlich hohe Werte deutlich über dem mittleren Skalenniveau mit tendenziell sehr niedrigen Standardabweichungen, sie deutet auch auf ein sehr homogenes Meinungsbild der Lehrpersonen hin. Dieser Befund ist einleuchtend, da die Probanden nicht nur insgesamt eine positive Grundeinstellung digitalen Medien und gewissermaßen auch AR gegenüber hatten, sondern auch die Usability insgesamt sehr positiv einschätzten (s.o. FF3₁). Entsprechend wird angenommen, dass die Lernumgebung neue Chancen zum erfolgreichen Lernen in den drei Ebenen nach Johnstone (1993) bietet und somit idealerweise das Risiko von Fehlvorstellungen (vgl. Kapitel 2.2) ebenfalls minimiert (vgl. Justi & Gilbert, 2002; Mayer, 2014a; Romrell et al., 2014; Schmalstieg & Höllerer, 2016). Wird die Usability eines Lernmaterials für besser wahrgenommen, so sollte sich ihr tatsächlicher Lernerfolg erhöhen (Karapanos et al., 2018). Gemäß Goodhue (1995) stellt die Usability einen Einflussfaktor auf die Akzeptanz dar und müsste entsprechend hoch mit dieser assoziiert sein (vgl. Bürg, 2005). Die Korrelationsanalysen bestätigen diesen Verdacht (s.u. FF6₁). Werden die drei Lernumgebungen differenziert voneinander betrachtet, so zeichnet sich, im Vergleich zur Beurteilung der Usability, ein leicht veränderter Trend ab:

HMD-AR-Setting (AR-Brille) < Simulations-Setting (Tablet) < AR-Setting (Tablet)

Die höchste Annahme bei Chemielehrkräften erfuhr die AR-Lernumgebung, wohingegen die simulationsbasierte Lernumgebung etwas niedriger eingestuft und das HMD-AR-Setting am wenigsten akzeptiert wurde. Dies lässt den Schluss zu, dass die Versuchspersonen die AR-Lernumgebung sehr positiv einschätzten und folglich am meisten akzeptierten (vgl. Bürg,

2005). Die Vermutung einer hohen Akzeptanz von AR im klassischen Tablet-Format, verglichen mit herkömmlichen digitalen Lernanwendungen, ist theoretisch durch die kognitionspsychologischen Gestaltungskriterien (Kontiguität und Split-Attention) aus Kapitel 3.3 zu begründen und wird empirisch durch die in Hauptstudie 1 aufgedeckten Ergebnisse unterstützt. Hypothese H4₁ kann daher teilweise beibehalten werden. Analog zur Usability scheinen die Lehrpersonen die HMD-AR-Lernumgebung auf der AR-Brille am wenigsten zu akzeptieren. Die Kovarianzanalyse mit anschließendem Bonferroni-Test untermauerte dieses Ergebnis, indem signifikante Unterschiede zwischen der AR-Lernumgebung auf dem Tablet und der HMD-AR-Technologie via AR-Brille mit einer mittleren Effektstärke gemessen wurden. Trotz ihres stark motivationalen Charakters konnte die AR-Brille offenbar die fachdidaktischen Anforderungen der Lehrpersonen nicht durchweg erfüllen. Begründet wird dies, analog zu FF3₁, durch den extrem hohen Grad an Unbekanntheit und die geringen Vorerfahrungen, die oftmals zu technischen und funktionalen Schwierigkeiten führten (Scheerer, 2021). Es offenbarte sich seit Ausbruch der Corona-Pandemie ein Beschleunigungseffekt in Hinblick auf Technologien, der entgegen der ursprünglichen Erwartungen (vgl. Kapitel 5.2) auf ihre Grenzen hinweist. Die unzureichende Usability der High-End-Technologie bindet vermutlich kognitive Ressourcen der Lehrpersonen, welche infolgedessen für die Modifikation und Konstruktion von Wissensstrukturen nicht verfügbar sind und so den Wissensaufbau und damit Lernerfolg stören (vgl. Buchner et al., 2021; Chandler & Sweller, 1991; Karapanos et al., 2018). In Anlehnung an aktuelle Befunde, welche AR-Brillen einen hohen *Extrinsic load* (vgl. Chandler & Sweller, 1991) zuschreiben (vgl. Buchner et al., 2021), könnte die kognitive Überlastung der Lehrkräfte zu einer geringeren Zufriedenheit mit der Technologie geführt haben. Außerdem zogen sich Problemlösungen bei technischen Schwierigkeiten mit der AR-Brille oftmals sehr in die Länge und hätten vermutlich eine „noch“ intensivere Technik-Betreuung erfordert. Nur wenn die technische Betreuung erfolgreich ist, kann die Akzeptanz gesteigert werden (Schallehn, 2004). Es ist nicht verwunderlich, dass keine weiteren signifikanten Unterschiede registriert wurden. Zum einen ähneln sich die simulations- und AR-gestützten Lernumgebungen auf dem Tablet sehr. Zum anderen ist der Vergleich zwischen non-AR- und HMD-AR-Variante sehr schwierig, da zwei Variablen verändert wurden (s.u. Kapitel 11.2). Entsprechend bestätigt das Datenmaterial, im Zusammenhang mit der Akzeptanz, dass der Umgang mit AR auf dem Tablet die höchste Zufriedenheit bei den Probanden erreichte. Die in Hypothese H4₁ aufgenommene Annahme, dass die Chemielehrkräfte die HMD-AR-Lernumgebung auf der AR-Brille eher als auf dem Tablet akzeptieren, muss daher verworfen werden. Folglich könnte es ein Vorhaben zukünftiger Forschungen sein, den Zusammenhang von Akzeptanz und Usability vor dem Hintergrund der kognitiven Belastung empirisch zu untersuchen.

Mit Forschungsfrage **FF5**₁ soll untersucht werden, wie die erhobenen Merkmale des Individuums mit den Merkmalen der AR-Lernumgebung zusammenhängen (vgl. Kapitel 5.2).

Einstellungen x Usability. Die Korrelationsanalysen lieferten hoch signifikante Werte zwischen den Einstellungen hinsichtlich digitaler Medien bzw. AR (Gesamt) und den Usability-Merkmalen *Individualisierbarkeit*, *Wirkung der Medien*, *Voraussichtliche Motivation* sowie *Voraussichtlicher Lernerfolg*. Überdies scheint eine positive Einschätzung der problemorientierten Didaktik der Lernumgebungen mit positiven Beurteilungen der Einstellungen hinsichtlich AR zusammenzuhängen. Auffallend dabei war, dass diese Personenmerkmale vor allem mit den didaktischen Kriterien der Lernumgebung, Individualisierbarkeit und Schultransfer, hoch assoziiert waren. Entsprechend nimmt für die Lehrkräfte, unter Berücksichtigung der Aufgeschlossenheit gegenüber digitalen Medien, die Lernwirksamkeit des digitalen Lernwerkzeugs eine essenzielle Rolle ein (vgl. Raita & Oulasvirta, 2011). Im Fokus steht dabei die Fachdidaktik. Usability-Ausprägungen wie die Angemessenheit der Anforderungen, technische Bedienbarkeit oder Verständlichkeit der Medien zeigten insgesamt nur sehr schwache bis keine Korrelationen mit den Einstellungen auf. Entsprechend scheinen die Einstellungen diese Aspekte weder zu bedingen noch von diesen beeinflusst zu werden. Die positiven Korrelationen erwecken den Anschein, dass die Lehrkräfte das pädagogisch-didaktische Potential von AR auf Basis ihrer positiven Einstellungen hinsichtlich digitaler Medien erkannten (vgl. Lauer & Pechel, 2023). Wohingegen die Einstellungen hinsichtlich digitaler Medien im Gesamten und einige ihrer Subskalen (v.a. zu TPCK-E und Allg-E) mäßig mit den Usability-Skalen korrelierten, demonstrierten die Einstellungen hinsichtlich AR und nahezu alle ihre Subskalen (TPK-E, TPCK-E und Allg-E) sehr hohe Zusammenhänge mit signifikanten Werten. Dieses Ergebnis eröffnet eine neue Sichtweise, da insbesondere eine aufgeschlossenerere Grundhaltung gegenüber AR hinsichtlich TPACK höhere Wechselwirkungen mit der Usability erzeugen sollte. Die Wirkrichtung wird nachstehend detailliert geklärt. Hohe (signifikante) Werte der gesamten Stichprobe können vermutlich auf die AR-Gruppe zurückgeführt werden. Dieser Verdacht stützt sich auf der spezifischen Erfassung der Einstellungen sowie der Usability, da sich einerseits die Personenmerkmale auf AR konzentrierten und andererseits die Lernumgebung in zwei Gruppen als AR-Variante elaboriert wurde (vgl. Bürg & Mandl, 2005). Entsprechend kann angenommen werden, dass die Assoziationen in der Simulations-Gruppe weniger stark ausgeprägt waren.

Selbstwirksamkeit x Usability. Im Einklang mit den Analysen von Bürg (2005) zeigten sich äußerst marginale Zusammenhänge zwischen den Haupt- bzw. Subskalen zu den Selbstwirksamkeitserwartungen hinsichtlich digitaler Medien bzw. AR und der Usability. Demnach scheint die Usability weitgehend unabhängig von den Selbstwirksamkeitserwartungen zu sein. Zwar wurden signifikante Zusammenhänge zwischen der Wirkung der Medien mit den Haupt- und Subskalen der *Selbstwirksamkeit* zu AR aufgedeckt, jedoch liefert das Datenmaterial höchstens erste Tendenzen von schwachen Zusammenhängen zwischen der Selbstwirksamkeit hinsichtlich AR und der Usability (z.B. in der Skala *Problemorientierte Didaktik*). Dabei wird

vermutet, dass die (positiven sowie u.a. negativen) Korrelationen in den Tablet-Gruppen höher als in der HMD-AR-Gruppe waren. Die Diagnose der eigenen medienbezogenen Fähigkeiten und Fertigkeiten kann für Lehrpersonen sehr komplex sein (vgl. De Jong et al., 2013), werden dann obendrein innovative und sogar unbekannte Technologien fokussiert, so scheint dieser Verdacht sehr naheliegend zu sein.

FF6₁ geht der Frage nach, wie die erhobenen Merkmale des Individuums und der AR-Lernumgebung mit der Akzeptanz zusammenhängen (vgl. Kapitel 5.2).

Einstellungen x Akzeptanz. Die Ergebnisse demonstrierten signifikante Zusammenhänge zwischen den Haupt- und Subskalen zu den Einstellungen und der Akzeptanz. Werden digitale Medien und AR als vorteilhaft für den MINT-Unterricht eingeschätzt, steigt deren Annahme als Lehr- und Lernmaterial. Dieser Befund stimmt mit den Erkenntnissen von Stark (2001) zu computerbasierten Einstellungen und von Schallehn (2004) zur Akzeptanz und Motivation beim selbstregulierten Lernen mit digitalen Medien überein. Die Untersuchungen zu Überzeugungen von Lehrpersonen zu digitalen Medien von Knüsel Schäfer (2020) bestätigen, dass positive Erfahrungen mit digitalen Medien, welche die Einstellungen ausbilden, mit Akzeptanzüberzeugungen einhergehen. Im Vergleich dazu konnte Bürg (2005) den Zusammenhang zwischen computerbezogenen Einstellungen und der Einstellungsakzeptanz nicht bestätigen. Er führte an, dass die Einstellungen auf den jeweiligen Technikbereich vor dem Hintergrund des Lehrens und Lernens ausdifferenziert werden müssten. Eben diese Präzisierung wurde in den Erhebungsinstrumenten mit Blick auf den Einsatz von digitalen Medien bzw. AR im Chemieunterricht (vgl. Vogelsang et al., 2019) berücksichtigt. Es ist demnach nicht verwunderlich, dass es sich um signifikante Zusammenhänge handelt, die die Ergebnisse von Bürg (2005) replizierten. Dabei zeigt sich, bezogen auf die Einstellungen zu AR, eine nahezu mittlere und damit höhere Korrelation als in den Einstellungen hinsichtlich digitaler Medien. Entsprechend lässt der größere Effekt bei den Einstellungen zu AR (vgl. Bandura, 2001) darauf schließen, dass insbesondere eine hohe Aufgeschlossenheit gegenüber innovativen Technologien wie AR mit einer hohen Annahme von AR einhergeht. Die Wirkrichtung wird im weiteren Verlauf diskutiert. Dieses Ergebnis ist sehr einleuchtend. Bereits die Einstellungen hinsichtlich digitaler Medien demonstrieren einen signifikanten Effekt. Entsprechend sollte sich die Signifikanz der Einstellungen bezüglich AR durch die Spezifizierung auf die Innovation erklären lassen (vgl. Bandura, 2001; Bürg, 2005). Im Zentrum der Studie stand das Thema „AR für den Chemieunterricht“. Nachdem die Probanden freiwillig an der Datenerhebung teilnahmen, sollte vermutlich ein erhöhtes Grundinteresse bestehen. Entsprechend scheint die Akzeptanz vor allem dann zu steigen, wenn die Lehrpersonen AR für lernwirksam erachten und eine positive Erwartungshaltung hinsichtlich des Einsatzes im Fachunterricht hatten. Dieser Befund steht im Einklang mit den Studienergebnissen von Raita und Oulasvirta (2011), welche den Einfluss

von Erwartungshaltungen auf die Beurteilung der Usability nachgewiesen haben. Im vorliegenden Fall könnte die hohe Aufgeschlossenheit gegenüber innovativen Technologien oder digitalgestützten Unterrichtsszenarien zu einem ähnlichen Effekt geführt haben. Dabei ist nicht auszuschließen, dass eine positive Grundeinstellung gegenüber AR die Lehrpersonen für Usability-Defizite sensibilisierte und folglich die Beurteilung sowie Zufriedenheit positiv beeinflusste (vgl. Bürg et al., 2005). Auf Basis der beantworteten Forschungsfragen FF3₁ und FF4₁ wird erwartet, dass die signifikanten Korrelationen vor allem auf die AR-Gruppe zurückgeführt werden können und eine positivere Einstellung gegenüber AR mit einer höheren Annahme von „einfachen“ AR-Szenarien einhergeht. Die Zusammenhänge bezüglich der HMD-AR-Lernumgebung sollten daher weniger stark sein. Zukünftige Forschungen könnten sich mit größeren Stichproben auf nur eine der drei Lernumgebungen, vorzugsweise ohne non-AR-Variante, fokussieren.

Selbstwirksamkeit x Akzeptanz. Laut Karapanos et al. (2018) sollten erfahrene und geübte Personen im Umgang mit Technologien tendenziell eher Interaktionsprinzipien wahrnehmen, Analogien herstellen, die Effektivität sowie Effizienz des Lernmaterials erkennen können und dieses als Lernwerkzeug annehmen. Befunde aus der Akzeptanzforschung offenbaren einen Einfluss des medienbezogenen Vorwissens auf die Akzeptanz (Venkatesh, 2000). Das Datenmaterial lieferte nur eine schwach ausgeprägte Korrelation zwischen der Gesamtskala zur Selbstwirksamkeit hinsichtlich digitaler Medien und der Akzeptanz. Die zugehörigen Subskalen stützten diese Resultate mit ähnlich niedrigen Zusammenhängen. Dieses Resultat ist sehr überraschend, da die Selbstwirksamkeit einen entscheidenden Einfluss auf die Annahme digitaler Medien (Hill et al., 1987) sowie Innovationen (Burkhardt & Brass, 1990) haben sollte. Obendrein sollte die Konzeptualisierung des Konstruktes *Selbstwirksamkeitserwartungen hinsichtlich AR* in der vorliegenden Studie eine spezifische Messung erlauben (vgl. Bandura, 1997), die laut Bürg und Mandl (2005) prinzipiell einen (signifikanten) Zusammenhang zwischen der Selbstwirksamkeit und der Akzeptanz nachweisen sollte. Obgleich die Selbstwirksamkeitserwartungen bezüglich digitaler Medien sämtliche Anwendungen, von Textverarbeitung bis hin zu Erklärvideos oder kollaborativen Werkzeugen abfragte und sich von der Beurteilung der Fähigkeiten bezüglich AR eindeutig abgrenzte, die Akzeptanz umfasste gebündelt alle drei Lernumgebungen mit dem Schwerpunkt AR. In zukünftigen Untersuchungen sollte die Selbstwirksamkeitserwartung spezifischer und mit stärkerem Bezug auf die jeweiligen technischen Anforderungen der entsprechenden digitalen Lernanwendung erfasst werden (vgl. Bürg & Mandl, 2005). Auch Ertmer et al. (2015) und Speer (2008) postulieren, dass Personenmerkmale möglichst differenziert zu erfassen sind. Per se handelte es sich bei den Lehrkräften um unerfahrene Personen im Bereich AR, die einen Großteil der verfügbaren Elaborationszeit für das Erlernen der Bedienung der App (Jeffels, 2011) oder eine erhöhte Anzahl an

kognitiven Ressourcen für die Orientierung in der Lernumgebung benötigen sollten (vgl. Karapanos et al., 2018). Knüsel Schäfer (2020) stellte in ihren Untersuchungen fest, dass Ablehnungsüberzeugungen vor allem bei erfahreneren Lehrpersonen auftreten, deren Erstkontakt mit digitalen Medien im Beruf stattfindet. Die Berufserfahrung kann daher als distaler Indikator angesehen werden. Entsprechend können „ältere“ und länger berufstätige Lehrkräfte, wie in der vorliegenden Studie überwiegend der Fall (vgl. Kapitel 8.1), digitalen Medien voreingenommener gegenüberstehen, da sie erfahrener mit verschiedenen Lernmaterialien sind und infolgedessen mehr Überzeugungen gebildet haben. Letztlich lieferte die deskriptive Analyse, dass die Probanden ihre Selbstwirksamkeit hinsichtlich AR größtenteils höher als erwartet und teils kontrovers zu den festgestellten Vorerfahrungen einschätzten. Zwar können positiven Erfahrungen die selbstgesteuerte Nutzung aus eigenem Antrieb erhöhen und damit die Selbstwirksamkeitserwartungen beeinflussen (vgl. Knüsel Schäfer, 2020), jedoch verwundert das Ergebnis, da nur ca. 9 % der Lehrkräfte, laut Angaben, Vorerfahrungen mit AR hatten. Dies lässt vermuten, dass es sich tendenziell um wenig kompetente Lehrkräfte bezüglich des Umgangs mit digitalen Medien handelte, deren positive Einschätzung auf Fehlvorstellungen zu (digitalen Medien und speziell) AR fußte. Gemäß Scheiter (2021) würden konservativere Einschätzungen der eigenen Fähigkeiten bezüglich AR auf faktisch hoch kompetente Lehrpersonen schließen lassen, da die Probanden den großen Handlungsspielraum von AR erkennen würden. Nachdem die Akzeptanz-Skala sehr hohe Werte lieferte, lassen sich die Ergebnisse nur schwer deuten und sollten mit weiteren Untersuchungen analysiert werden. Letztlich scheint in diesem Zusammenhang das Novum „AR“ für das uneinheitliche Bild verantwortlich zu sein. Abgesehen davon wäre es denkbar, dass die Lehrkräfte insgesamt Misserfolgsbefürchtungen hatten und die Daten dadurch (positiv) beeinflussten (vgl. Karapanos et al., 2018). Nachdem die Lehrpersonen wussten, dass sie im Rahmen der Datenerhebung einer für Lehrkörper eher untypischen Leistungssituation ausgesetzt waren, erscheint ein befürchteter Misserfolg als Einflussgröße durchaus plausibel. Werden die Korrelationen in den einzelnen Gruppen gesichtet, so kann dieser Befund nur untermauert werden. Die Einschätzungen der eigenen Fähigkeiten im Umgang mit AR standen daher zu keinem Zeitpunkt in einem Zusammenhang mit der Zufriedenheit der Lernumgebung. Das Resultat scheint nachvollziehbar zu sein, da bereits Bürg (2005) selbiges zwischen den Skalen *Allgemeine Selbstwirksamkeit* und *Einstellungsakzeptanz* in Bezug auf das „damalig neuere“ E-Learning feststellte. Bürg (2005) stütze sich auf dem Konstrukt der allgemeinen Selbstwirksamkeitserwartungen (vgl. Schwarzer, 1994). In der vorliegenden Studie wurden die Selbstwirksamkeitserwartungen, orientiert an Vogelsang et al. (2019), fachspezifisch vor dem Hintergrund digitaler Medien im Allgemeinen und der Konkretisierung auf AR betrachtet. Zwar nannten ältere Forschungen die Selbstwirksamkeit als einen wichtigen Indikator für die Akzeptanz von innovativen Technologien (vgl.

Burkhardt & Brass, 1990; Compeau & Higgins, 1995). Obgleich die domänenspezifische Erfassung der Selbstwirksamkeitserwartungen, in Anlehnung an Bandura (2001), eine signifikante Korrelation sicherstellen sollte, konnte dieser Effekt mit der durchgeführten Studie nicht bestätigt werden. Dies erscheint zwar auf den ersten Blick wenig plausibel, da die Einschätzung der eigenen Fähigkeiten ein starkes Motiv darstellen sollte (vgl. Knüsel Schäfer, 2020), jedoch kann der drastische Neuheitsgrad von AR als High-End-Technik erneut als Erklärung herangezogen werden. Damalige Studien fokussierten sich auf den Computer als Innovation. AR hingegen eröffnet methodisch und medial eine vollkommen neue Ebene der digitalen Visualisierung (Prümper, 2008; vgl. Kapitel 4.1). Die geringen Vorerfahrungen (vgl. Vogelsang et al., 2019) und die damit einhergehende Unwissenheit im Bereich AR, schränken vermutlich das adäquate Einschätzungsvermögen der Testpersonen ein. Nachdem die Probanden des Öfteren (technische) Hilfen während der Bearbeitung der Lernumgebung benötigten, könnte die Wechselwirkung beeinträchtigt worden sein. Ferner ist nicht auszuschließen, dass Wissensdefizite im Bereich Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis per se sowie zur chemischen Fachsprache und dem Donator-Akzept-Konzept die Beurteilung negativ beeinflussten und wider Erwarten nicht signifikante Zusammenhänge erzeugten. Schließlich stellt das Vorwissen eine wesentliche Einflussgröße auf den Wissensaufbau dar (vgl. Karapanos et al., 2018; Kroß & Lind, 2001), was sich demnach auf die Zufriedenheit mit der Lernumgebung auswirken kann.

Usability x Akzeptanz. Die bivariate Betrachtung der Usability mit der Akzeptanz lieferte ein sehr homogenes Bild. Hinsichtlich der gesamten Stichprobe wurden durchweg in allen Usability-Skalen signifikante Werte diagnostiziert, wobei die funktionalen Gestaltungskriterien schwächer mit der Akzeptanz assoziiert waren. Die Individualisierbarkeit und Verständlichkeit der Medien demonstrierten mittlere Zusammenhänge. Wohingegen die Befunde von Stark et al. (2001) den Einfluss instruktorischer Maßnahmen auf die Akzeptanz nachweisbar zeigten, konnten Bürg und Mandl (2005) keine signifikanten Korrelationen hinsichtlich der Individualisierbarkeit und Verständlichkeit der Medien mit der Akzeptanz bestätigen. Gegebenenfalls wurden die drei Usability-Merkmale im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit zu global erfasst (vgl. Bürg & Mandl, 2005) und sollten in zukünftigen Forschungen spezifizierter erhoben werden. Alle anderen Usability-Skalen korrelierten hoch mit der Akzeptanz. Die vorliegende Studie liefert eindeutige Anhaltspunkte für den Einfluss der Usability auf die Akzeptanz (vgl. Bürg & Mandl, 2005), die in diesem Kapitel näher analysiert werden. Folglich wird geschlossen, dass hohe Einschätzungen hinsichtlich der Usability mit einer größeren Zufriedenheit der Lernumgebung einhergehen sollten. Knüsel Schäfer (2020) betont, dass die wahrgenommene Effizienz digitaler Lernszenarien durch die Rahmenbedingungen wie die Ausstattung des Schulhauses oder durch mangelhafte medienbezogene Kompetenzen eingeschränkt sowie durch ihr Motivierungspotenzial oder den Zeitpunkt des Erstkontakts unterstützt werden

kann. Entsprechend können Gewöhnungseffekte, die häufig im wiederholenden Nutzungsverlauf auftreten und die Usability-Bewertung positiv beeinflussen (vgl. Sauro, 2011), nicht ausgeschlossen werden. In dieser Studie sollte die Bewertung der Usability in ihrer wechselwirkenden Funktion auf die Akzeptanz als sehr gehaltvolles Ergebnis angesehen werden, da die Lernumgebung für den singulären Gebrauch konzipiert wurde (vgl. Karapanos et al., 2018). Ferner untermauert das Resultat teilweise die Befunde von Bürg (2005) und Stark et al. (2001). Obwohl alle Skalen spezifisch mit Blick auf den Chemieunterricht konstruiert wurden, lagen die Reliabilitäten der Angemessenheit der Anforderungen und Verständlichkeit der Medien lediglich im akzeptablen Bereich und waren damit „noch“ ausreichend (vgl. Bortz & Döring, 2016; Kuckartz et al., 2013). Dies könnte ausschlaggebend dafür sein, dass die Merkmale in geringerem Maße mit der Akzeptanz assoziiert waren. Laut Bürg (2005) sollte die mediale Gestaltung der Lernumgebung verständlich sein, um einen kumulativen Wissenszuwachs zu fördern und Akzeptanz zu sichern. Negative Einschätzungen zur Wirksamkeit einer Lern-App und damit zur Akzeptanz könnten auf ein zu stark ausgeprägtes Fähigkeitsselbstkonzept der Teilnehmenden zurückgeführt werden (vgl. Scheiter, 2021). Folglich ist es denkbar, dass das Thema „Elektrolyse von Zinkiodid“ von den Lehrkräften inhaltlich zu trivial eingeschätzt wurde, die Reflexion von Stoff- und Teilchenebene nicht immer in das Zentrum der Elaboration gesetzt werden konnte und so die Beurteilung der Qualität negativ beeinflusst wurde. Bei der Betrachtung des Wissenserwerbs durch das Setting scheinen die Themen „Stoff-Teilchen-Konzept“ und „Redoxreaktion“ nur schwer voneinander abgrenzbar gewesen zu sein (vgl. Hauptstudie 2). Letztlich könnte es ein mangelndes Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis per se sein, weswegen die Bewertung teilweise geringere Werte aufwies. Bei der Einschätzung der didaktischen Gestaltung (z.B. voraussichtlicher Lernerfolg und voraussichtliche Motivation von Lernenden) hingegen zeigte sich ein klareres Bild. Gegebenenfalls fiel es den Versuchspersonen leichter, die Lernumgebung mit Blick auf die Verwendung im Klassenzimmer zu beurteilen. Schließlich zeigten sich vor allem jene Probanden sehr zufrieden mit der AR-Lernumgebung, die diese zugleich als sehr lernförderlich einordneten. Chemielehrkräfte scheinen die Lernumgebung dann zu akzeptieren, wenn sie das Lernen mit ihr effektiv, effizient und zufriedenstellend empfanden (vgl. Figl, 2010). Die Bedeutsamkeit der intrinsischen Motivation und des subjektiven Lernerfolgs/Lerntransfers bei der Gestaltung von digitalen Medien wurde auch von Bürg und Mandl (2005) betont. Die Didaktik im Allgemeinen kristallisiert sich durchweg als entscheidender Faktor für die Akzeptanzförderung heraus (vgl. Kopp et al., 2003). Erwartungsgemäß scheint eine positive Beurteilung der Usability, vor allem mit Blick auf die mediendidaktische Gestaltung, die perspektivischen Lernprozesse bei Schülern und die mediale Wirkung, mit einer hohen Zufriedenheit einherzugehen (s. Tabelle 31). Dabei könnten sich die hoch signifikanten Zusammenhänge mit der Akzeptanz stärker auf den Tablet-Gruppen als auf der HMD-AR-Gruppe stützen. Als Begründung wird hierfür die Authentizität der Lernumgebung

angeführt. Die Lehr- und Lernforschung postuliert immer wieder, dass authentische, fallbasierte Lernumgebungen eine akzeptanzfördernde Wirkung besitzen (vgl. Bürg & Mandl, 2005; Gräsel, 1997; Reinmann-Rothmeier & Mandl, 2001). Die Anschaffungskosten einer AR-Brille sind derzeit noch hoch und die Digitalisierung an den Schulen allgemein in stetiger Weiterentwicklung, sodass die Lehrpersonen in Tablet-gestützten Lernszenarien vermutlich ein höheres Potential sehen (vgl. Tschiersch et al., 2021). Dieser Verdacht gilt jedoch mit varianzanalytischen Verfahren weiter zu untersuchen. Angesichts der kleinen Stichproben in den drei Gruppen bedarf die Stärke der gefundenen Zusammenhänge und demnach ihre theoretische Bedeutsamkeit weiterer Exploration und Präzision. Die Befunde weisen lediglich darauf hin, dass die Usability von digitalen und innovativen Lernumgebungen einen großen Einfluss auf die Akzeptanz hat.

FF7₁ fokussiert die Fragestellung, inwieweit die Merkmale des Individuums und der Lernumgebung auf die Akzeptanz wirken (vgl. Kapitel 5.2). Die Wirkungsanalysen stützten sich auf den Korrelationsuntersuchungen und offenbarten Einflüsse von den Einstellungen hinsichtlich AR auf bestimmte Ausprägungen der Usability, sowie auf die Akzeptanz. Ferner wirkten gewisse Usability-Merkmale auf die Akzeptanz, was wiederum zu Mediatoranalysen führte (vgl. Kapitel 9.3), die nachstehend diskutiert werden.

Einstellungen hinsichtlich AR x Akzeptanz. Die erste schrittweise Regression zeigte, dass der Zusammenhang zwischen der Aufgeschlossenheit gegenüber AR und der Zufriedenheit eine Wirkrichtung ausgehend von den Personenmerkmalen aufweist. Dieses Ergebnis deckt sich mit den Annahmen von Schallehn (2004). Da es sich um eine AR-Studie handelte und die Lehrpersonen mit ihrer freiwilligen Teilnahme eine hohe Innovationsbereitschaft und Offenheit für Neues zeigten, wurde die Akzeptanz der Lernumgebungen vermutlich durch die Einstellungen zu AR gefiltert und akzentuiert (vgl. Knüsel Schäfer, 2020). Die Längsschnittstudie von Bosse et al. (2017) demonstriert, dass die Offenheit für innovative Lernarrangements als Prädiktor auf die Einstellungen und Selbstwirksamkeit von Lehrkräften bezogen auf den inklusiven Unterricht wirken kann. Den Befunden zufolge sollten Lehrende, die Innovationen offen gegenüberstehen, positive Einstellungen hinsichtlich digitaler Medien besitzen, sodass sich die Zufriedenheit mit der Lernanwendung erhöht (vgl. Knüsel Schäfer, 2020).

Usability x Akzeptanz. Überdies lieferte die schrittweise Regression mit Blick auf die Usability ein Modell mit drei Variablen. Dabei stellte sich die problemorientierte Didaktik als bedeutendste Einflussgröße auf die Akzeptanz heraus. Es wurden zudem weitere erwartungskonforme Ergebnisse bezüglich der Zusammenhänge zwischen den Merkmalen der Lernumgebung und der Akzeptanz aufgedeckt (vgl. Bürg, 2005). Hiernach stellte der voraussichtliche Lernerfolg den zweitwichtigsten Prädiktor dar. Die Forschungen von Bürg und Mandl (2005) oder Reinmann-Rothmeier und Mandl (2001) weisen der selbstregulierten Steuerung eine

zentrale Rolle zu. Die Ergebnisse der vorliegenden Studie können dies bestätigen, da die Individualisierbarkeit der Lernumgebung als Einflussgröße auf die Akzeptanz identifiziert wurde. Dies scheint einleuchtend, da das selbstregulierte Lernen mit digitalen Medien bzw. AR das Autonomieerleben erhöhen kann (vgl. Deci & Ryan, 2000), was sich wiederum auf die Annahme der digitalen Lernanwendung auswirken kann. Nachdem sich aber in der Skala *Individualisierbarkeit* eine mäßige Reliabilität messen ließ (vgl. Kapitel 9.1.2), überrascht es nicht allzu sehr, dass die Individualisierbarkeit im Vergleich zur problemorientierten Didaktik stärker in den Hintergrund rückte. In Anlehnung an Schallehn (2004) kann abgeleitet werden, dass die Akzeptanz von AR vor allem dann steigt, wenn die Qualität der Lernumgebung vorteilhaft für das Lernen im Fach Chemie erlebt wird. Insbesondere die problemorientierte Didaktik stellt einen erfolgsversprechenden Ausgangspunkt für den weiteren Einsatz des digitalen Konzepts im Fachunterricht dar (vgl. Kopp et al., 2003).

Einstellungen hinsichtlich AR x Usability. Die Einstellungen zu AR wurden in einem neuen Regressionsmodell als Prädiktorvariablen betrachtet, wobei die Variablen *Individualisierung*, *Problemorientierte Didaktik*, *Wirkung der Medien*, *Voraussichtliche Motivation* und *Voraussichtlicher Lernerfolg* in den jeweiligen Modellen als Kriterien fungierten (vgl. Kapitel 9.3.3). Auf Basis der Korrelationsanalysen zeichnete sich eine sichtliche Wirkrichtung ab, die in Anlehnung an Raita und Oulasvirta (2011) den Einfluss von der persönlichen Erwartungshaltung gegenüber AR auf die Usability beschreibt. Der selbstregulierten Steuerung wurde bereits in den Forschungen von Bürg und Mandl (2005) oder Reinmann-Rothmeier und Mandl (2001) eine zentrale Rolle zugewiesen. Sie offenbarte sich mit der Skala *Individualisierbarkeit* auch in Hauptstudie 1 eindeutig als Einflussgröße. Da diese Skala sehr wenige Items besaß, sollten die Befunde aber vorsichtig gedeutet werden und weitere Untersuchungen mit einer Skala von höherer Inhaltsvalidität durchgeführt werden (vgl. Döring & Bortz, 2016). Ferner demonstrieren die Ergebnisse den Einfluss der Personenmerkmale auf die problemorientierte Didaktik und die Wirkung der Medien (vgl. Kopp et al., 2003). Im Vergleich zur (medien-) didaktischen Gestaltung wurden für die Skalen *Voraussichtliche Motivation* und *Voraussichtlicher Lernerfolg* höhere Erklärungsbeiträge der Varianz gemessen. Demnach lässt sich ableiten, dass eine hohe Aufgeschlossenheit mit positiven Einstellungen gegenüber AR zu einer positiveren Einschätzung der Lernumgebung bezüglich des Schultransfers und ihrer voraussichtlichen Wirkung auf Lernende führt. Sichtlich demonstrieren die Befunde, dass für Lehrpersonen die Lernförderlichkeit eines innovativen Lernszenarios bei Schülern im Fokus steht und durch die persönlichen Meinungen bedingt werden kann.

Usability als Mediator. Auf Grundlage der Ergebnisse aus Kapitel 9.3.1 bis 9.3.4 wurden die Individualisierbarkeit, problemorientierte Didaktik und der voraussichtliche Lernerfolg auf Mediation untersucht. In Anlehnung an die Befunde von Schallehn (2004) sowie Raita und Oulasvirta (2011) lieferten die Mediationsanalysen sehr hohe direkte Effekte zwischen:

- Einstellungen zu AR und der Akzeptanz.
- Einstellungen zu AR und den drei untersuchten Mediatoren
- jeweiligem Mediator und der Akzeptanz, unter Kontrolle des direkten Einflusses von den Einstellungen zu AR auf die Akzeptanz

Dabei sank die Wirkung der *Einstellungen zu AR* durchweg, sodass in allen drei Modellen eine Mediatorwirkung der jeweiligen Usability-Ausprägung nachgewiesen werden konnte. Das Modell mit dem Mediator *Voraussichtlicher Lernerfolg* verlor sogar an Signifikanz (= totaler Mediatoreffekt). Dieser Befund demonstriert die besondere Stellung der Lernumgebung als lernförderliches Lernwerkzeug für Schüler. Es zeigt sich deutlich, nur wenn die Lehrpersonen eine hohe Lernwirksamkeit in der technischen Anwendung sehen, wird diese als Lernmaterial angenommen. Gleichwohl geht die besondere Rolle der Personenmerkmale komplett zurück. Entsprechend scheint sich bei Lehrkräften lediglich die Usability, vollkommen unabhängig von der Aufgeschlossenheit gegenüber AR, auf die Annahme der Technologie auszuwirken und damit die wesentliche Einflussgröße für den perspektivischen Einsatz der Lernumgebung im Fachunterricht zu sein. Ähnliche, aber weniger stark ausgeprägte, Ergebnisse lieferten die beiden anderen Modelle mit den Mediatoren *Individualisierbarkeit* und *Problemorientierte Didaktik* und ihren partiellen Effekten. Sie verweisen auf den schwindenden Einfluss der Einstellungen hinsichtlich AR und die wachsende Wichtigkeit der didaktischen Kriterien. Per se scheint dieses Ergebnis plausibel zu sein, wenn man bedenkt, dass die Probanden an einer AR-Studie teilnahmen und eine gewisse Grundhaltung dieser Technologie entgegenbrachten, die letztlich zur Annahme des Konzepts der Lernumgebungen führte. Nach Karapanos et al. (2018) kann die Usability des Lernmaterials mit ihrem Einfluss auf den Lernerfolg als Kernelement für den vielversprechenden Wissensaufbau von Lernenden angesehen werden. Es ist demnach leicht nachvollziehbar, dass die Annahme bzw. Ablehnung des Lernmaterials bei Lehrkräften auf der Systemqualität der Technologie fußt und den Schwerpunkt auf das fachdidaktische Potential setzt. Ihre Überzeugungen können sich verändert haben (vgl. Knüsel Schäfer, 2020), sodass ursprüngliche und neue Einstellungen hinsichtlich AR voneinander abweichen. Waren diese internalen Faktoren zeitinstabil und aufgrund des Neuheitsgrads von AR nicht fest verankert, so ist naheliegend, dass eine (wenig) chancenreiche Lernumgebung (nicht) überzeugt und die Wirkung der Personenmerkmale nachlässt oder vollkommen zurückgeht. Angesichts dessen wäre es empfehlenswert die Veränderungen der Einstellungen in zukünftigen Untersuchungen zu erfassen (vgl. Knüsel Schäfer, 2020).

Da die Regressionsanalyse über alle drei Gruppen hinweg durchgeführt wurde, sollten Rückschlüsse auf die Akzeptanz von AR als solche nur mit Vorsicht getroffen werden. Nachdem sich in dem Datenmaterial zur Usability und Akzeptanz auch die Bewertungen der Simulationsgruppe befanden, könnten die Ergebnisse einem Nebeneffekt obliegen. Die domänenspezifi-

sche Spezifikation der Einstellungen (hier: AR) sollte möglichst konkret auf dieselben Kennzeichen der Lernumgebung (hier: augmentierte Objekte) abzielen (vgl. Bürg & Mandl, 2005; Ertmer et al., 2015; Speer, 2008). Da dies nicht der Fall war, könnten die Ergebnisse manipuliert worden sein. Es wird angemerkt, dass die Einschätzungen der Akzeptanz und Usability nur marginale Unterschiede zwischen den Tablet-Gruppen demonstrierten (vgl. Kapitel 9.1.2 und 9.4), sodass diese Möglichkeit weitgehend ausgeschlossen werden kann. Es sollten sich dennoch weitere Forschungen anschließen, die sich nur auf AR-Lernszenarien stützen. Die Vermutung einer vollständigen Mediation im Regressionsmodell mit allen unabhängigen Variablen (Individualisierbarkeit, Problemorientierte Didaktik, Voraussichtlicher Lernerfolg und Einstellungen zu AR) auf die Akzeptanz als Kriteriumsvariable konnte nicht bestätigt werden (vgl. Kapitel 9.3.5). Es wird daher angenommen, dass die Einstellungen zu AR die drei nebeneinander wirkenden Mediatoren beeinflussten, welche wiederum alle auf die Akzeptanz wirkten. Demzufolge wird geschlussfolgert, dass, insbesondere im Zusammenhang mit AR, die didaktische Gestaltung einen größeren Einfluss als die Einstellungen hinsichtlich AR auf die Akzeptanz hatte. Es zeichnet sich der Trend ab, dass ein didaktisch-wertvolles Lernarrangement, welches erfolgsversprechend für den Fachunterricht zu sein scheint, die Annahme bei Lehrpersonen erhöht. Auch die Forschungen von Karapanos et al. (2018) demonstrieren, dass bei der mediendidaktischen Auswahl von digitalen Lernanwendungen der Usability für die Erreichung der Unterrichtsziele eine essenzielle Rolle zukommt. Die Technik als solche ist demnach für Lehrkräfte kein „Allheilmittel“ zur Lösung didaktischer Probleme (vgl. Schallehn, 2004), vielmehr sehen sie in ihr das Potential neue Lernarrangements kreieren zu können, wenn sie sich auf einem didaktisch wertvollen Konzept stützen.

Unter Kontrolle der *Usability*-Variablen *Individualisierbarkeit*, *Problemorientierte Didaktik* und *Voraussichtlicher Lernerfolg* wurden zudem mit der Kovarianzanalyse signifikante Unterschiede für die Akzeptanz der verschiedenen Lernumgebungen aufgedeckt. Die Ergebnisse bestätigten, dass die problemorientierte Didaktik und der voraussichtliche Lernerfolg die Akzeptanz signifikant vorhersagen. Die Individualisierbarkeit lieferte nur eine erste Tendenz für die Vorhersage der Akzeptanz. Nach Bereinigung um die drei Usability-Merkmale konnte ein signifikanter Unterschied zwischen der Akzeptanz der AR- und der HMD-AR-Lernumgebung gemessen werden. Dieser Befund deutet darauf hin, dass sich die Zufriedenheit der Tablet-Gruppen ähnelte und sich die Akzeptanz von AR aufgrund der technischen Settings (Tablet als klassische Variante vs. AR-Brille als High-Tech-Variante) unterschied. Zwar scheinen die Lehrpersonen insgesamt zufrieden mit AR und vor allem mit der High-Tech-Variante gewesen zu sein, dennoch wurde die Usability der Tablet-Variante deutlich besser als jene der AR-Brille eingestuft. Unterschiedlich fiel die Annahme in den beiden Gruppen nach Bereinigung der Usability-Merkmale aus und scheint damit die Annahme der beiden Lernsettings voneinander abzugrenzen. Die Usability- und Akzeptanz-Einschätzungen hinsichtlich AR verweisen daher

auf ein komplexes Bild. Mit Blick auf die Ergebnisse von Habig (2019), Keller et al. (2021), Huwer et al. (2019) oder Buchner und Zumbach (2020) kann AR auf dem Tablet für bestimmte Situationen als lernwirksames Werkzeug angesehen werden. Neben diesen positiven Erkenntnissen mit vielversprechenden Beurteilungen der Systemqualität (vgl. Lauer & Peschel, 2023; Wyss et al., 2021) wurden aber auch geringe Lerneffekte gemessen (vgl. Buchner et al., 2021), die teilweise auch in Hauptstudie 2 bestätigt werden (vgl. Kapitel 12). Es bleibt daher unklar, wie diese Gruppenunterschiede zu deuten sind. Nachdem es sich um kleine Stichprobengrößen in den drei Gruppen handelte, können die Ergebnisse nur als Trends angesehen werden und sollten im Zuge weiterer Akzeptanzforschungen hinsichtlich AR für den Chemieunterricht näher analysiert werden.

VI HAUPTSTUDIE 2

11 Materialien und Methoden Hauptstudie 2**11.1 Stichprobe**

Mit dem Ziel den Einfluss von AR auf das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis durch den Umgang mit (M)ER zu analysieren (s. FF1₂, FF2₂, FF3₂ und FF4₂ in Kapitel 5.3), wurden aus der Stichprobe von Hauptstudie 1 zufällig 60 Chemielehrkräfte (65 % Frauen und 35 % Männer; Alter: $M = 28$, $SD = 5.2$) ausgewählt. Die Probandenselektion aus der Gesamtstichprobe (vgl. Kapitel 8.1) stützt sich einerseits auf das Unterrichtsfach und andererseits auf die Schulform. Nicht alle der 157 MINT-Lehrkräfte unterrichten (schwerpunktmäßig) Chemie, sodass dies als Hauptausschlusskriterium für Hauptstudie 2 anzusehen war. Ferner mussten die Probanden das Anforderungsniveau der Testaufgaben hinsichtlich der Fachinhalte (vgl. Kapitel 11.4.1) erfüllen. Dies sollte insbesondere durch Auswahl entsprechender Lehrkräfte, die an bestimmten Schulformen wie Gymnasium und Fach- bzw. Berufsoberschule tätig sind, sichergestellt werden, da diese auch in der Sekundarstufe 2 unterrichten und ein entsprechendes Vorwissen aufweisen sollten. Es handelte sich daher in Hauptstudie 2, ähnlich der Verteilung in der Gesamtstichprobe (vgl. Hauptstudie 1, Kapitel 8.1), vorrangig um Gymnasiallehrkräfte aus Bayern und teils um Lehrkräfte aus Fach- bzw. Berufsoberschulen (FOS/BOS), wobei wenige Probanden an einer Realschule unterrichteten. Über die Hälfte der Lehrpersonen ist seit mindestens sechs Jahren im Dienst. Sie können daher nach Hubermann (1991) als (sehr) erfahrene Lehrkräfte angesehen werden ($N = 34$). Weitere 18 Probanden sind seit vier bis sechs Jahren als Lehrpersonen tätig und befinden sich damit in einer Stabilisierungsphase, die auf eine mäßige bis leicht erhöhte Berufserfahrung schließen lässt. Lediglich eine Testperson unterrichtet weniger als 12 Monate und wird als unerfahren eingestuft (vgl. Hubermann, 1991).

Es erfolgte ein Ausschluss des Datenmaterials auf Basis fehlender oder mangelhafter Testbearbeitungen, die keine Prä-Post-Zuordnung oder Datenverarbeitung ermöglichten.

11.2 Experimentelle Designs

Die experimentelle Vergleichsstudie zur Analyse des Einflusses von AR auf das Denken in den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) und damit auf die Bildung der mentalen Modelle ist in einem einfaktoriellen Prä-Post-Design gestaltet. Die unabhängige Variable (UV_1) von Studiendesign 1 besteht in der medialen und instruktionalen Gestaltung der Lernumgebung und besitzt zwei Ausprägungen. Variiert wird die Benutzersteuerung in der AR-Lernumgebung unter Berücksichtigung der virtuellen Repräsentationsformen und der Simulation unter Berücksichtigung der animierten Repräsentationsformen. Beide Lernumgebungen sind auf dem Medium Tablet aufrufbar und in Bezug auf den Stoff-Teilchen-Ebenenwechsel informationsgleich. Sie unterscheiden sich nur hinsichtlich der Integration der repräsentierten Informationen. Während die Simulation einen Split-Attention erzeugt, da die Informationen zeitlich und räumlich

nicht mit der realen Versuchsanordnung verknüpft sind, stellt AR in seinem integrierten Format Kontiguität sicher (vgl. Kapitel 6.4 und 8.3). Die abhängige Variable (AV) ist das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis, die durch den adäquaten Wechsel zwischen makroskopischer und submikroskopischer Ebene operationalisiert wird. Neben den themenspezifischen Aufgaben aus Prä- und Posttest (vgl. Kapitel 8.4) wird zu ihrer Erfassung ein Kategoriensystem zum Umgang mit Stoff- und Teilchenebene erstellt (s.u. Kapitel 12.1.1). Überdies soll die zusätzliche Analyse der fachsprachlichen Kompetenz die Untersuchung des Stoff-Teilchen-Konzeptverständnisses unterstützen und insgesamt Aufschluss über das Denken in den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) geben. Folglich wird ergänzend der Umgang mit den Repräsentationsformen in den Testaufgaben erhoben. Für seine Operationalisierung werden die Einordnungen verbalsprachlicher Äußerungen aus den Protokollen des Lauten Denkens in das Kategoriensystem zum Umgang mit (M)ER verwendet (vgl. Kapitel 12.1.2). Entsprechend nahmen 40 Probanden während des Präsenztreffens an einer Prä-Post-Befragung zur Erfassung des Stoff-Teilchen-Konzeptverständnisses teil. Dabei wurden sie randomisiert der non-AR- oder AR-Lernumgebung zugewiesen.

Tabelle 43 zeigt eine Übersicht des einfaktoriellen experimentellen Designs mit den erwarteten Effekten von UV_1 auf AV. Basierend auf den Befunden der Kognitionspsychologie zum Split-Attention-Effekt nach Ayres und Sweller (2021) und dem Kontiguitätsprinzip nach Mayer und Fiorella (2021) wurde in den Hypothesen $H1.1_2$, $H1.2_2$ und $H2_2$ der Forschungsfragen $FF1_2$ und $FF2_2$ (vgl. Kapitel 5.3) formuliert, dass Unterschiede zwischen der Experimentalgruppe ($N = 20$), die die AR-Lernumgebung bearbeitet, und der Vergleichsgruppe ($N = 20$), die die simulationsbasierte non-AR-Lernumgebung elaboriert, erwartet werden. Entsprechend sollte sich UV_1 als mediale und instruktionale Gestaltung der AR-Lernumgebung positiv auf die AV als Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis auswirken und eine sichtbare Verbesserung des Stoff-Teilchen-Konzeptverständnisses sowie in diesem Kontext eine deutliche Verringerung von Fehlvorstellungen nach sich ziehen (vgl. Tabelle 43). Im Vergleich dazu sollte UV_1 als mediale und instruktionale Gestaltung der simulationsbasierten Lernumgebung die AV in deutlich niedrigerem Ausmaß beeinflussen, sodass sich insgesamt eine wesentlich geringere Verbesserung bei der Auseinandersetzung mit dem Stoff-Teilchen-Ebenenwechsel und den Repräsentationsformen offenbart (vgl. Tabelle 43).

Tabelle 43. Studiendesign 1; UV₁ Mediale und instruktionale Gestaltung der Lernumgebung sowie den erwarteten Effekten auf AV Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis.

UV₁: Mediale und instruktionale Gestaltung der Lernumgebung		
	Kontrollgruppe <i>Simulation auf dem Tablet</i> (N = 20)	Experimentalgruppe <i>AR-Lernumgebung auf dem Tablet</i> (N = 20)
AV: Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis	Konzeptverständnis verbessert/ ggf. Fehlkonzepte verringert; geringe Verbesserung des Umgangs mit den Repräsentationsformen und der Fachsprache.	Konzeptverständnis sichtbar verbessert/ Fehlkonzepte deutlich verringert; deutliche Verbesserung des Umgangs mit den Repräsentationsformen und der Fachsprache

Zudem soll untersucht werden, ob die Interaktivität der AR-Lernumgebungen, bedingt durch den immersiven Charakter des AR-Settings, einen positiven Einfluss auf das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis und hinsichtlich der chemischen Fachsprache auf das Denken in den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) hat (vgl. FF₃₂ und FF₄₂ in Kapitel 5.3). Hauptstudie 2 verwendet daher ein weiteres einfaktorielles Design mit paarweisem Gruppenvergleich (s. Tabelle 44). Demnach wurde die Interaktivität in der AR-Lernumgebung als zweite unabhängige Variable (UV₂) betrachtet. Sie stützt sich auf zwei Ausprägungen: Einerseits können die AR-Repräsentationen interaktiv auf dem Bildschirm des Tablets gesichtet und gesteuert werden. Andererseits wird durch den Einsatz der HMD-AR-Technik auf der AR-Brille die interaktive Steuerung der virtuellen Repräsentationen in der realen Umgebung mit einem immersiven Erleben ermöglicht. Die inhaltsgleichen Lernumgebungen unterliegen nun einem Wechsel des Mediums. Entsprechend des in Tabelle 43 vorgestellten experimentellen Designs mutierte die einst beschriebene Experimentalgruppe, welche AR auf dem Tablet abrufte, nun zu einer Kontrollgruppe (N = 20). Diese wurde mit einer neuen Experimentalgruppe verglichen (vgl. Tabelle 44), die aus 20 weiteren Versuchspersonen bestand und mit der HMD-AR-Lernumgebung auf der AR-Brille arbeitete. Als abhängige Variable wurden, analog zu dem obigen Design, unter Berücksichtigung des Umgangs mit den interaktiven (M)ER, das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis (AV) und daraus folgend die Bildung von mentalen Modellen bei den Versuchspersonen operationalisiert. Dabei ist die Vergleichbarkeit zwischen simulations- und HMD-AR-gestützten Setting aber nicht gegeben, da in Hinblick auf die instruktionale Gestaltung (AR vs. non-AR) und die Interaktivität (immersive AR-Objekte vs. digitale nicht-immersive Objekte) zwei Variablen verändert werden würden. In einem analogen Vorgehen zu obigen experimentellen Design wird die AV mithilfe der Testaufgaben aus Prä- und Posttest (vgl. Kapitel 11.4.1), die per Lautem Denken (vgl. Kapitel 11.4.3) elaboriert und mittels Kategoriensystem zum Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis (vgl. Kapitel 12.1.1) ausgewertet werden, erfasst. Zusätzlich erfolgt die Operationalisierung des Umgangs mit (M)ER durch die Einordnungen verbalsprachlicher Äußerungen aus den Protokollen des Lauten Denkens in das Kategoriensystem zum

Umgang mit (M)ER (vgl. Kapitel 12.1.2). Tabelle 44 gibt einen Überblick über UV₂ und AV des experimentellen Designs betreffend des Medienwechsels (Tablet vs. AR-Brille). Es werden große Effekte bei der Versuchsgruppe, die mit der AR-Lernumgebung auf dem Tablet arbeitet, (vgl. Kontrollgruppe in Tabelle 44) hinsichtlich des Einflusses von UV₂ auf AV erwartet. Schließlich sollte die Experimentalgruppe, welche die AR-Brille nutzt, eine noch größere Wirkung von UV₂ auf AV aufzeigen (vgl. Tabelle 44), da sie mit den immersiven augmentierten (M)ER besser auf repräsentativer Ebene operieren kann (vgl. Kapitel 15.3). Dies sollte das Denken in den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) immens fördern und zu einem sichtlich verbesserten Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis führen (vgl. Hypothesen H3₂ und H4₂ in Kapitel 5.3).

Tabelle 44. Studiendesign 2 mit UV₂ Interaktivität der Lernumgebung sowie den erwarteten Effekten auf AV Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis.

UV₂: Interaktivität in der AR-Lernumgebung		
	Kontrollgruppe <i>AR-Lernumgebung auf dem Tablet</i> (N = 20)	Experimentalgruppe <i>HMD-AR-Lernumgebung auf der AR-Brille</i> (N = 20)
AV: Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis	Konzeptverständnis sichtbar verbessert/ Fehlkonzepte deutlich verringert; Deutliche Verbesserung des Umgangs mit den Repräsentationsformen und der Fachsprache	Konzeptverständnis deutlich verbessert/ Fehlkonzepte eindeutig verringert; sichtlich verbesserter Umgang mit den Repräsentationsformen und der Fachsprache

Neben der Erfassung von personenbezogenen Daten wie Alter, Geschlecht, Berufserfahrung, Schulform, Fortbildungen zu digitalen Medien und AR etc. wurde als zusätzliche Kontrollvariable das Fachwissen zum chemischen Inhalt der Lernumgebung (hier: Redoxreaktionen) erhoben. Ferner wurde die chemische Fachsprache ergänzend für die Operationalisierung der AV erfasst, indem für jede Versuchsgruppe die Hälfte der Protokolle des Lauten Denkens (jeweils N = 10) hinsichtlich des Umgangs mit (M)ER ausgewertet und analysiert wurde. Gemäß des qualitativen Stichprobenplans sollte diese Anzahl ausreichen, um das Denken in den Drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) untersuchen zu können (Döring & Bortz, 2016).

Von den 60 Versuchspersonen nahmen 53 an der digitalen Vorbefragung teil. 52 Lehrkräfte füllten zum Schluss den digitalen Akzeptanz- und Usability-Test aus. Es zeigt sich, dass die Datensätze in Hinblick auf alle fünf Etappen der Studiendurchführung (vgl. Kapitel 8.5 und 11.5) unvollständig waren. Dies lässt sich dadurch erklären, dass das Datenmaterial der verschiedenen Messzeitpunkte entweder einander nicht zugeordnet werden konnte oder die Probanden digitale Untersuchungsetappen ausgelassen haben. Ein Testlängeneffekt könnte für das unvollständige Datenmaterial bezüglich der Abschlussbefragung verantwortlich sein. Die Probanden wurden gegebenenfalls demotiviert (vgl. Moosbrugger & Kelava, 2012) und haben

sodann die Teilnahme vorzeitig abgebrochen. Dies ist jedoch für Hauptstudie 2 unproblematisch, da die Analysen von Hauptstudie 1 und 2 unabhängig voneinander abliefen und lediglich die Datenzuordnung von Prä- und Posttest (s.u. Kapitel 11.4.1) mit zugehöriger Bearbeitung der Lernumgebung sichergestellt werden musste.

11.3 Gestaltung der Lernumgebung

Für die Beantwortung der Forschungsfragen von Hauptstudie 2 (s. Kapitel 5.3) wurden die drei Lernumgebungen aus Hauptstudie 1 (s. Kapitel 8.3) eingesetzt.

11.4 Erhebungsinstrumente und –methoden

11.4.1 Prä- und Posttest

Für die Erfassung des Merkmals *Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis* unter Berücksichtigung der chemischen Fachsprache (s. AV der Hauptstudie 2 in Kapitel 11.2; Tabellen 43 und 44 und FF1₂, FF2₂, FF3₂ und FF4₂ in Kapitel 5.3) wurden zwei themenspezifische Tests zum Donator-Akzeptor-Konzept erstellt. Als Prä- und Posttest sollten die beiden Testinstrumente vor und nach Bearbeitung der jeweiligen Lernumgebung eingesetzt werden (vgl. Jonkisz et al., 2012). Die folgende Tabelle 45 liefert eine Übersicht der Aufgaben des Prä- und Posttests mit ihren jeweiligen Strukturen, die nachstehend beleuchtet werden:

Tabelle 45. Übersicht der Aufgabenzuordnung in Prä- und Posttest bezüglich Art, Fachinhalt, Repräsentationswechsel ausgehend von Stoffebene (S) und/oder Teilchenebene (T) und Ankeraufgabe.

	Aufg.	Art	Fachinhalt	Repräsentationswechsel (S/T)		Anker-aufg.
				Von	In	
Prätest	1	Offen	Redoxreaktion <i>Synthese NaCl</i>	Text; S+(T)	Text+Symbol+Bild	
	2	Offen	Säure-Base-Reaktion <i>Neutralisation</i>	(Text)+Symbol; T	Text+Symbol	
	3	Offen	Redoxreaktion <i>Galvanisieren</i>	Text; S+(T)	Text+Symbol+Bild	X
	4	Offen	Redoxreaktion <i>Gewinnung von Blei</i>	Text+(Symbol); T	Text+Symbol	X
	5	MC	Redoxreaktion <i>Quecksilber/Nitrat</i>	Text+Symbol; S+T	Text+Symbol	
Posttest	1	Offen	Säure-Base-Reaktion <i>Cyanidin</i>	Text+Symbol; S+T	Text+Symbol	
	2			<i>s.o. Ankeraufgabe 4 in Prätest</i>		
	3	Offen	Redoxreaktion <i>Hochofenprozess</i>	Text+(Symbol); S+T	Text+Symbol+Bild	
	4			<i>s.o. Ankeraufgabe 3 in Prätest</i>		
	5	MC	Redoxreaktion <i>Kupfer/Eisen</i>	Text+(Symbol); S+T	Text+Symbol	

Die Klammerdarstellung „()“ demonstriert den im Verhältnis geringeren Einsatz der Repräsentationsform in der Aufgabe.

Um die Effektivität von AR auf das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis bei den Chemielehrkräften erfassen zu können, wurde bei der Testkonstruktion auf Qualitätsparameter geachtet. Alle Aufgaben aus Prä- und Posttest wurden derart konzipiert, dass sie bei den Chemielehrkräften durch die Elaboration per Lautem Denken diverse Richtungen der kognitiven Verarbeitung provozieren können (Sandmann et al., 2002; vgl. Kapitel 11.4.3). Zum einen sollte der Wissensabruf aus dem Gedächtnis und zum anderen der Wissensaufbau durch Wissenserzeugung mittels (logischer) Inferenzen initiiert werden (Kintsch, 1993; s. Kategoriensystem in Kapitel 12.1). Inferenzen stellen demnach Veränderungen der gegebenen Informationen dar, indem auf das bestehende Wissen aus dem Langzeitgedächtnis zurückgegriffen wird (Kintsch, 1993; Kroß & Lind, 2001). Mit Blick auf die beiden experimentellen Designs (vgl. Kapitel 11.2) war es wichtig, dass beide Erhebungsinstrumente als Paper-Pencil-Tests zur Durchführung von Einzeltestungen konzipiert wurden. Direkte Beobachtungen von Einzelfällen sollten einen tiefgehenden Einblick in das Elaborationsverhalten der Probanden gewähren (vgl. Kapitel 11.4.3).

Testinhalte. Jeder Test umfasst fünf Testaufgaben zum chemischen Donator-Akzeptor-Konzept (vgl. ISB, 2023c; KMK, 2005), die mit den theoretischen Konstrukten aus den Kapiteln 1 bis 3 verknüpft wurden (vgl. Kauertz, 2014). Die Testaufgaben intendieren damit Beschreibungen und Erklärungen chemischer Phänomene, wobei gezielt Wechsel von Stoff- auf Teilchenebene (und umgekehrt) sowie in diesem Zusammenhang Übersetzungsleistungen zwischen den (M)ER forciert werden. Alle Aufgaben enthalten demzufolge Texte mit oder ohne zusätzlichen Symbolen, die die Stoff- oder/und Teilchenebene veranschaulichen (s.o. Tabelle 45). Es handelt sich bei den Symbolen überwiegend um Partikel- oder Summenformeln, die divers mittels weiterer Symbole, wie zum Beispiel für Phasen, in Reaktionsgleichungen eingebettet und mit den Texten verknüpft wurden. Die Inhalte zu den Ebenen wurden teilweise explizit, aber auch punktuell implizit, eingebunden. In Aufgabe 1 zum Farbstoff Cyanidin des Posttests (s. A.3.1.3 Posttest in Anhang) kann die gegebene Strukturformel als Teilchenebene und der angeführte Textinhalt zur Zubereitung des Kohls als Stoffebene verstanden werden. Die Beurteilung, auf welcher Ebene man sich bei der Nutzung der gegebenen (M)ER sowie bei der Anwendung neuer (M)ER befindet, sollte von der Lehrkraft selbst erfolgen. Mit Blick auf das Forschungsziel war es unabdingbar, dass der Schwierigkeitsgrad in Hinblick auf das Donator-Akzeptor-Konzept deutlich geringer als im Umgang mit den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) war (vgl. Lind et al., 2004). Demnach durften die fachlichen Inhalte zum Donator-Akzeptor-Konzept zu keiner weiteren Belastung bei der Zielgruppe führen. Redox- sowie Säure-Base-Reaktionen sind in den Lehrplänen der Realschulen und Gymnasien ab Klasse 9 durchweg verankert (vgl. ISB, 2023c). Ausgebildete Chemielehrkräfte, vor allem mit langjähriger Unterrichtspraxis (vgl. Kapitel 11.1), sollten aufgrund ihres umfangreichen chemischen

Vorwissen vertraut mit diesen chemischen Inhalten sein. Für den Fall, dass bestimmte Themeninhalte (z.B. Aufgabe 3 des Posttests zum Hochofenprozess, vgl. A.3.1.3 Posttest in Anhang) kaum oder nicht im Schulalltag angewandt werden, sollten sie angesichts ihres Lehramtsstudiums mit naturwissenschaftlicher Fachrichtung die Aufgabenanforderungen dennoch bewältigen können.

Testaufbau. Tabelle 45 macht deutlich, dass beide Tests einen identischen Aufbau bezogen auf die Anzahl und Art sowie Fachinhalte der Aufgaben besitzen. Ferner wurden zwei Ankeraufgaben integriert, indem zwei Testaufgaben des Prätests ohne inhaltlicher oder formaler Abänderung im Posttest aufgenommen wurden (vgl. Walpuski & Ropohl, 2014). Derart soll ein sinnvoller Testvergleich begünstigt werden. Veränderungen im Elaborationsverhalten können dann auf die Bearbeitung der Lernumgebungen zurückgeführt werden. Bei der Bestimmung der Testlänge spielt neben der Anwendbarkeit des Tests vor allem die motivationale Lage der Versuchspersonen eine essenzielle Rolle (Jonkisz et al., 2012). Demzufolge wurde eine Anzahl von fünf Testaufgaben in Prä- bzw. Posttest festgelegt (vgl. Lienert & Raatz, 1998). Beide Tests setzen sich auf Basis des Donator-Akzeptor-Konzepts jeweils aus vier Aufgaben zu Redoxreaktionen und einer Aufgabe zu Säure-Base-Reaktionen (vgl. Tabelle 45) zusammen (s. auch exemplarische Aufgaben in Kapitel 11.4.2). Indem eine weitere Aufgabe zu Säure-Base-Reaktionen integriert wurde, sollte eine Vergleichsmöglichkeit bei der Anwendung des Donator-Akzeptor-Konzepts geschaffen werden. Da bereits das Laute Denken in den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) selbst die Aufgabenschwierigkeit erhöht, wird eine (zeit-) intensive Aufgabenbearbeitung erwartet. Infolgedessen schien eine Testlänge von fünf Aufgaben erfolgsversprechend für die präzise Erfassung des Merkmals *Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis* zu sein ohne dass mit größeren motivationalen Einbußen gerechnet werden muss (vgl. Jonkisz et al., 2012). Demotivation bei der Testbearbeitung kann zu einer nicht mehr konstruktgemäßen Elaboration der Aufgaben führen, was sich negativ auf die Bearbeitungsqualität der Tests auswirken könnte (vgl. Jonkisz et al., 2012). Darüber hinaus galt es im Zusammenhang mit der Aufgabenanzahl die für die Testaufgabenbeantwortung vorgegebene Zeit zu berücksichtigen. Ein erster Testdurchlauf mit anschließendem Experten-Rating (vgl. Vorgehen nach Osterlind, 1998) schätzte die Bearbeitungszeit für Prä- bzw. Posttest mit jeweils fünf Aufgaben auf ca. 30 Minuten. Orientiert an der Aufgabenkomplexität und dem Vorwissen der Probanden wurde die zeitliche Elaboration einer Testaufgabe auf fünf bis zehn Minuten geschätzt. Da jedoch unterschiedliche Elaborationstypen die Testaufgaben verschieden lange und intensiv bearbeiten können und ihre kognitiven Modellierungsprozesse umfassend aufgedeckt werden sollen, wurde der Testbearbeitung kein zeitliches Limit gesetzt (vgl. Lienert & Raatz, 1998). Jeder Test enthält vier Aufgaben mit offener Frage im Sinne eines Kurzaufsatzes und eine Aufgabe mit geschlossener Fragestellung getreu der Multiple-Choice-Technik (vgl. Tabelle 45). Nachdem auch die Aufgabenstellung das Elaborationsverhalten beeinflussen kann, sollte

der zusätzliche Aufgabentyp in Form der geschlossenen Fragestellung die Versuchspersonen motivieren (vgl. Jonkisz et al., 2012). Da die beiden Multiple-Choice-Aufgaben (MC) sehr textlastig sind und eine gute Lesekompetenz der Lehrkräfte fordern (vgl. A.3.1.2 Prätest in Anhang), sollte eine einzige derartige Aufgabe pro Test ausreichen, um die Probanden zeitlich und kognitiv nicht zu überbelasten sowie die Zumutbarkeit der Tests zu gewähren (Moosbrugger & Kelava, 2012). Im Vergleich zu den MC-Aufgaben, die auf Basis der Schülervorstellungen zu Stoff- und Teilchenebene (vgl. Kapitel 2.2) Aufschluss über die (nicht) gewünschten Formulierungen geben und das Elaborationsverhalten stark lenken können, gestatten offene Fragestellungen einen individuell entfaltbaren Bearbeitungs- und Kommunikationsspielraum (vgl. Tepner & Dollny, 2014). Sie eignen sich insbesondere für die eigenständige Wissensanwendung und forcieren, neben mündlichen Verbalisierungen, schriftliche Kurzaufsätze, die Wissensreproduktionen erwirken können (Jonkisz et al., 2012). In diesem Kontext ist zu erwähnen, dass die MC-Aufgaben aus Prä- und Posttest nicht nur als Auswahl- sondern auch als Beurteilungsaufgaben zu betrachten sind. Die Probanden sollten nämlich individuelle Einschätzungsurteile erbringen, indem sie stets ihre Gedankengänge hinsichtlich der Itemauswahl verbalisieren. Im Rahmen der Erhebung per Lautem Denken können sie daher aufgrund ihres Erklärungsanspruchs auch Kurzaufsätze nach sich ziehen (vgl. Jonkisz et al., 2012). Insgesamt bürgen offene Fragestellungen zwar die Schwierigkeit einer objektiven Auswertung, da vielfältige Bewertungen denkbar sind, zur Erfassung der Text-Symbol-Verarbeitung (vgl. Multimediales Lernen nach Schnotz, 2001 in Kapitel 3.3) mittels Lautem Denken stellen sie aber eine sehr wertvolle Informationsquelle dar. Sie können mit wissenschaftlich adäquaten Auswertungsmethoden durchaus objektiv analysiert werden (Lienert & Raatz, 1998; vgl. Kategoriensystem in Kapitel 12.1).

Experten-Rating. Zur Erreichung eines hohen Maßes an Testgüte wurden 13 Aufgaben einschließlich jener aus Prä- und Posttest von acht Fachdidaktik-Experten mit Erfahrung in der Aufgabenentwicklung analysiert (vgl. Osterlind, 1998; Terzer et al., 2013). Es schlossen sich mit allen Aufgaben ein Probetestdurchlauf sowie ein Experten-Rating zur Begutachtung der möglichen Elaborationen an, auf dessen Basis die Aufgaben hinsichtlich ihrer Qualität bewertet, ausgewählt und weiterentwickelt wurden (vgl. Tepner & Dollny, 2014). Neben den Aufgabenschwierigkeiten sollte die Validität, Reliabilität und Objektivität von Prä- und Posttest beurteilt werden (Lienert & Raatz, 1998; Terzer et al., 2013; Tepner & Dollny, 2014). Verschiedene Experten hatten im Zuge des Testdurchlaufs alle Aufgaben mit Blick auf das zu untersuchende Merkmal *Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis* vor dem Hintergrund des Umgangs mit (M)ER übereinstimmend elaboriert. Nachdem die erneute Aufgabenbearbeitung in einem kurzen Zeitabstand bei den Experten ähnliche Elaborationsverhalten aufdeckte, sollte es sich sowohl um objektive als auch um reliable Tests handeln. Die Aufgaben wurden auch in Hinblick

auf ihre Validität vor Einsatz in Hauptstudie 2 getestet und dahingehend verifiziert. Im Vergleich zu studierten Chemikern, die geringe Merkmalsausprägungen aufwiesen, elaborierten Fachdidaktiker die Aufgaben tendenziell intensiver und gingen mehr auf die Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) ein (vgl. Lienert & Raatz, 1998). Darüber hinaus unterstützten danach rege Diskussionen mit den Fachdidaktik-Experten zur Sprache, Instruktion, Aufgabenschwierigkeit, dem Testaufbau sowie Fachinhalt unter Berücksichtigung der drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) die finale Aufgabenfertigstellung hinsichtlich der Selektions- und – Anpassungsprozesse. Vor allem längere Aufgaben mit einer komplexeren sprachlichen Aufbereitung (z.B. viel Text oder verstärkte Einbindung von (M)ER) mussten intensiv auf ihre Qualität geprüft und angepasst werden (vgl. Lienert & Raatz, 1998; Terzer et al., 2013).

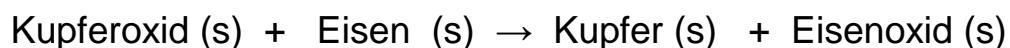
Insgesamt wurden alle Testaufgaben inklusive ihrer Darstellungen selbst erstellt. Lehr- und Lernmaterialien sowie Schulbücher unterstützten bei der inhaltlichen Aufbereitung. Im Anhang werden beide Tests, vollständig mit allen Testaufgaben und zugehörigen Musterlösungen, aufgeführt (s. A.3.1.2 bis A.3.1.5 in Anhang)

11.4.2 Entwicklung der Testaufgaben

Exemplarisch an den nachstehenden beiden Aufgaben wird die Testaufgabenentwicklung näher beleuchtet:

MC-Aufgabe (Aufgabe 5 aus Posttest)

Gegeben sei eine Redoxreaktion:



Schritt 1: Paraphrasieren Sie in eigenen Worten die im Kasten angeführte chemische Reaktion.

Schritt 2: Die folgenden Aussagen a) bis f) sollen die im Kasten angeführte chemische Reaktion beschreiben. Die verschiedenen Lösungen stützen sich zum Teil auf gängige Schülervorstellungen. Diskutieren Sie alle der angeführten Aussagen vor dem Hintergrund der chemischen Fachsprache und der Stoff- sowie Teilchenebenen. Bewerten Sie die Schülervorstellungen, die sich in den Aussagen widerfinden, aus fachlicher Perspektive und nennen Sie gegebenenfalls Verbesserungsvorschläge.

- Bei der Reduktion von Kupferoxid und der Oxidation von Eisen erhält man als Produkt Eisenoxid mit roten Kupferkügelchen.
- Bei der gegebenen Redoxreaktion wird das Sauerstoffatom von Kupferoxid auf das Eisen übertragen. Es handelt sich um einen Sauerstoffaustausch mit O_2 - Molekülen.
- Bei der Reduktion der Kupfer-Ionen und der Oxidation von festem Eisen entsteht elementares Kupfer und FeO .
- Bei der Redoxreaktion wird das Oxid-Anion O^{2-} von Kupferoxid CuO auf das Eisen Fe übertragen. Dabei entstehen rote Kupferatome Cu und grauschwarzes Eisenoxid FeO .
- Bei der exothermen Reaktion ist nach Entfernen des Bunsenbrenners noch immer ein Glühen zu beobachten, sodass die Cu^{2+} -Ionen des Kupferoxids zu Cu -Atomen reduziert und das Eisen zu Fe^{2+} -Ionen oxidiert werden.
- Die Redoxreaktion findet ausschließlich zwischen Cu^{2+} - Ionen und Fe - Atomen durch eine Übertragung der Elektronen statt.

Abbildung 34. Exemplarische MC-Aufgabe im gemischten (gebundenen und offenen) Antwortformat (vgl. Aufgabe 5 aus Posttest).

*Offene Aufgabe (Aufgabe 2 aus Prätest)***Szenario:**

Als Chemielehrkraft thematisieren Sie *Säuren und Basen* (Hinweis: Die Jahrgangsstufe ist abhängig von Ihrem Standort und dem Lehrplan). Erklären Sie mithilfe der gegebenen Reaktionsgleichung die Bedeutung von *Neutralisationsreaktionen*. Erläutern Sie die chemischen Hintergründe der Reaktion unter Rücksichtnahme der chemischen Fachsprache. Differenzieren Sie in Ihren Beschreibungen und Erläuterungen explizit zwischen Stoff- und Teilchenebene.

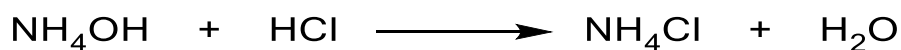


Abbildung 35. Exemplarische Testaufgabe im offenen Antwortformat (vgl. Aufgabe 2 aus Prätest).

Aufbau der Testaufgaben. Die Aufgabenstellungen der offenen Aufgaben und MC-Aufgaben setzen sich aus zwei Teilen, dem Aufgabenstamm und dem Antwortformat, zusammen (vgl. Rost, 2004). Der Aufgabenstamm enthält stets eine chemische Frage oder Problemstellung, für die es eine Lösung zu entwickeln gilt. Die in Abbildung 35 demonstrierte MC-Aufgabe beinhaltet als Stamm eine Wortgleichung zur Beschreibung einer Redoxreaktion und eine Instruktion zur (beliebigen) Paraphrasierung des chemischen Phänomens. Gefolgt von einer Fragestellung liefert die Aufgabe sodann sechs Antwortoptionen, welche vor dem Hintergrund der Triplet-Beziehung nach Johnstone (1993, 2000) auf die Beschreibung und Erklärung der Redoxreaktion abzielen (vgl. Jonkisz et al., 2012). Indem mehrere Antwortmöglichkeiten implementiert wurden, sollte ein Erraten der Lösungen minimiert werden (vgl. Jonkisz et al., 2012). Dabei wurden, neben korrekten Inhalten, klassische Fehler und Schülervorstellungen (vgl. Kapitel 2.2; ISB, 2023b; Anton, 2002) als Distraktoren integriert. Die Menge an chemischen Darstellungsformen mit ihren Verknüpfungen macht es Lernenden nicht immer leicht chemische Inhalte zu verstehen (vgl. Kapitel 3.4; Bernholt et al., 2012). Da der Umgang mit der chemischen Fachsprache mit zahlreichen Hürden verstrickt sein kann (vgl. Kapitel 3.4), treten häufig Fehler und Irrtümer während des Lernprozesses auf. In diesem Zusammenhang ist jedoch ein Lernen aus Fehlern möglich, da „clever“ integrierte Fehler äußerst hilfreich für den Wissensaufbau sein können (Oser, 2005). Wird das Falsche als inkorrekt bewertet, so kann das Richtige vielmehr als korrekt anerkannt werden. Entsprechend wurden die drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) oftmals unzureichend oder falsch miteinander verknüpft, indem fehlerbehaftete Stoff-Teilchen-Ebenenwechsel in den Antwortalternativen verankert wurden. Daher enthält die abgebildete MC-Aufgabe in Abbildung 35 unsaubere Formulierun-

gen oder Missachtungen der Teilchenebene wie zum Beispiel „rote Kupferatome“ (vgl. Musterlösung in Anhang (A.3.1.5 Posttest)). Auf diese Art und Weise sollten die Probanden herausgefordert werden, alle Aussagen hinsichtlich des Fachinhalts, der Stoff- und Teilchenebene sowie des Umgangs mit (M)ER zu eruieren und gegebenenfalls zu optimieren. Darüber hinaus wurden Inhalte eingebunden, die auf den ersten Blick weder richtig noch falsch sind. Exemplarisch muss bei Aussage d) ausgiebig reflektiert werden, welche Begrifflichkeiten der Stoff- und welche der Teilchenebene zuzuordnen sind. Wird der Verbindungsname „Eisenoxid“ als Teilchen betrachtet, wäre die Betitelung als solches wünschenswert und die Ergänzung der Farbeigenschaft „grauschwarz“ unzulässig (vgl. MC-Aufgabe in Abbildung 35). Macht die Versuchsperson jedoch deutlich, dass der Name der Verbindung „Eisenoxid“ auf Stoffebene fokussiert wird, so handelt es sich um eine korrekte Aussage. Es gilt dann nur noch zu klären, welchen Bezug die Lehrkraft zur Summenformel „FeO“ herstellt. Überdies wurden entgegengesetzte Antwortoptionen eingebunden, die sicherstellen sollen, dass die Versuchsteilnehmer konzentriert arbeiten. Eine gewissenhafte Elaboration der MC-Aufgabe lässt logische Schlussfolgerungen zu und schließt aus, dass mehrere Auswahloptionen, wie Aussage b) zur Übertragung von Sauerstoff-Atomen und Aussage d) zur Übertragung von Oxid-Anionen (vgl. Abbildung 35), zugleich richtig bzw. falsch sind. Auch die Aufgaben im Kurzaufsatzformat (vgl. exemplarische Aufgabe in Abbildung 36) setzen sich aus der Beschreibung eines chemischen Phänomens (z.B. Neutralisation mittels Säure und Base) und einer dazugehörigen Frage zusammen (vgl. Jonkisz et al., 2012). Dabei umfasst der Stamm, wie in Abbildung 36 angeführt, sowohl Texte als auch Symbole. Anstatt vorformulierter Aussagen, wie in der MC-Aufgabe (vgl. Abbildung 35), wurden im offenen Antwortformat Leerzeilen integriert, die die Probanden ermutigen sollen, ihr Wissen eigenständig durch die gegebenen (M)ER auf Stoff- und Teilchenebene kognitiv zu aktivieren, abzurufen und zu verbalisieren. Das Risiko eine Antwort zufällig ohne tiefgehende Elaborationen zu wählen, wird damit schlichtweg umgangen (vgl. Jonkisz et al., 2012). Exemplarisch fordert Aufgabe 2 des Prättests (vgl. Abbildung 36) die Fokussierung auf die symbolische Darstellung, welche ein tiefgehendes Elaborationsverhalten mit diversen Wechseln in Text, Symbol oder auch Bild bewirken kann (vgl. Tabelle 45). Die Aufgabe macht deutlich, dass die angeführten Repräsentationen eine intensive Auseinandersetzung mit der Teilchenebene intendieren können (z.B. symbolische Darstellung der Teilchenprozesse „Protonenübergänge von Säuren und Basen“ in Form von Ionenschreibweise; vgl. A.3.1.4 Musterlösung in Anhang).

Gestaltung der Repräsentationen in den Testaufgaben. Um die Informationsentnahme positiv zu beeinflussen, war es aus kognitionspsychologischer Perspektive unabdingbar Gestaltungskriterien aus Kapitel 3.3 zu berücksichtigen. Getreu dem Kohärenz- und Kontiguitätsprinzip nach Mayer und Fiorella (2021) wurden daher die Texte und Symbole räumlich so positioniert, dass sie sinnvoll integriert und lernwirksam miteinander verbunden wurden. Dabei galt es redundante Informationen zu minimieren (vgl. Redundanzprinzip nach Kalyuga & Sweller, 2014) und insgesamt Split-Attention (Ayres & Sweller, 2021) zu vermeiden. Entsprechend wurden unterschiedliche Repräsentationsformen, die gleiche Inhalte darstellen, weitgehend reduziert. Demzufolge benötigt beispielsweise die Angabe „NH₄OH“ in Aufgabe 2 des Prätests (vgl. Abbildung 36) keine zusätzliche Nennung des Verbindungsnamens *Ammoniumhydroxid*. Die Verwendung von MER sollte eine Verbindung zu bestehenden mentalen Modellen bezüglich der Triplet-Beziehung nach Johnstone (1993) herstellen. Sie wurden daher, gemäß des Multiple-Repräsentationen-Prinzip (Ainsworth, 2014; Mayer, 2021a), einerseits ergänzend in die Testaufgaben eingebunden, um bei den offenen Antwortformaten die kognitive Verarbeitung während der Arbeit mit komplexeren Fachinhalten (vgl. Aufgabe 1 zur Mesomerie des Posttests; A.3.1.5 in Anhang) zu unterstützen. Andererseits wurden sie bei den MC-Aufgaben verschiedenartig (in-) korrekt eingesetzt, um den Facettenreichtum der chemischen Fachsprache zu demonstrieren und für ein weites Spektrum an Selbsterklärungen zu sorgen, die sich auf diversen Denkprozessen stützen können (vgl. Kroß & Lind, 2001).

Instruktionen der Testaufgaben. Die Aufgabenstellungen wurden derart konzipiert, dass sie auf Basis des Fachinhalts fachdidaktische Begründungen fordern, die per Lautem Denken geäußert werden sollen. Zum Zwecke der Durchführungsobjektivität wurden bei allen Testaufgaben klare Arbeitsanweisungen integriert, die sprachlich präzise formuliert wurden (vgl. Jonkisz et al., 2012; Lienert & Raatz, 1998). Mithilfe von Operatoren sollte die Aufgabenbearbeitung so gelenkt werden, dass gezielte Repräsentationswechsel auf Stoff- und Teilchenebene initiiert werden können (vgl. Jonkisz et al., 2012; Kauertz, 2014). Jede Aufgabe instruiert die Probanden eine geeignete chemische Fachsprache anzuwenden und in den Beschreibungen sowie Erläuterungen explizit zwischen Stoff- und Teilchenebene zu differenzieren (vgl. Abbildungen 35 und 36), sodass Ebenenwechsel bewusst angeregt werden können. Die gegebenen (M)ER, beispielsweise in Form von Reaktionsgleichungen aus Summenformeln wie in Aufgabe 2 (vgl. Abbildung 36), können submikroskopisch oder makroskopisch verstanden werden. Dabei wird deutlich, dass die Einordnung in die entsprechende Ebene durch die Lehrkraft erfolgen muss. Neben den inhaltlichen Vorgaben wurden auch methodische Instruktionen wie z.B. die Nutzung geeigneter Symbole (Oxidationszahlen) eingebunden. Auf diese Art und Weise sollte die Aufgabenbearbeitung gesteuert und das gewünschte Elaborationsverhalten provoziert werden. Der Inhalt der Ankeraufgabe zu Bleioxid (vgl. A.3.1.2 und A.3.1.4 in Anhang) fordert

demgemäß die Vervollständigung der Reaktionsgleichung, die Verwendung der Oxidationsstufen oder auch die Formulierung der Teilgleichungen und gibt die erwarteten Repräsentationswechsel explizit an. Schließlich instruiert die MC-Aufgabe (vgl. Abbildung 35) die Probanden vorgegebene Antwortalternativen nicht nur auf ihre Richtigkeit zu prüfen, sondern auch Verbesserungsvorschläge anzuführen (vgl. Jonkisz et al., 2012). Ein bloßes Ankreuzen von Richtigem oder Falschem würde demnach die Ziele der Aufgabe verfehlen. Ferner beinhalten einige Testaufgaben im offenen Antwortformat Fallszenarien und stützen sich auf praktisch relevanten Fachinhalten zu Unterrichtsentwürfen, wodurch die Nützlichkeit der Tests aufgezeigt werden soll (vgl. Moosbrugger & Kelava, 2012). Da die Inhalte der Testaufgaben auf dem LehrplanPLUS des achtjährigen Gymnasiums in Bayern (vgl. KMK, 2005; ISB, 2023c) beruhen, sollten die Probanden zu situativen, gegebenenfalls simulierten Unterrichtsvorträgen ermutigt werden. Demnach enthalten die Testaufgaben Formulierungen, die die Probanden direkt als Lehrkörper ansprechen (vgl. „Als Chemielehrkraft einer neunten Klasse [...] thematisieren Sie [...]“ – Aufgabe 2 des Prätests, vgl. Abbildung 36). Die Versuchspersonen können sich entsprechend in ihre Rolle als Lehrkraft einfinden und schülergerechte Erklärungen, ähnlich wie im realen Unterrichtsgeschehen, liefern. Durch eine derartige „Unterrichtssimulation“ sollte die Testelaboration erleichtert werden.

Schwierigkeitsgrad der Testaufgaben. Bei der Testkonstruktion wurde auf die Aufbereitung der Aufgabenformate und deren Eignung zur Zielerreichung geachtet (vgl. Osterlind, 1998). Aus Tabelle 45 geht hervor, dass zwei Aufgaben des Prätests, ohne Abänderung, als Ankeraufgaben in den Posttest aufgenommen wurden (vgl. Bortz & Döring, 2016). Die restlichen Aufgaben des Posttests ähneln aufgrund der gleichen Struktur jenen des Prätests und schaffen so bei den Versuchspersonen Vertrautheit mit dem Testverfahren. Jedoch musste vermieden werden, dass sich die Probanden vor der Elaboration des Posttests auf diesen einstellen konnten. Herausforderungen und Hürden bei der Aufgabenbearbeitung sollten weiterhin unbekannt bleiben. Angesichts dessen wurde der Schwierigkeitsgrad in den Aufgaben 1, 3 und 5 des Posttests angehoben, indem aufwendigere Aufgabenformate mit schwierigeren Zielen integriert wurden, die per se mehr Zeit in Anspruch nehmen und einen möglichen Trainingseffekt beim Lauten Denken kompensieren bzw. minimieren (vgl. Osterlind, 1998):

Prinzipiell werden identische Übersetzungsleistungen in beiden Tests erwartet, da stets Repräsentationswechsel von Text (und Symbol) in Text, Symbol (und Bild) erreicht werden können (vgl. Tabelle 45). Diese sind jedoch im Posttest komplexer umzusetzen. Wohingegen es den Probanden im Prätest häufiger freigestellt wurde mit welchen Darstellungsformen sie die Aufgaben bearbeiten (z.B. Aufgabe 1: beliebiges Modell bei der NaCl-Synthese; vgl. A.3.1.2 in Anhang), fordert der Posttest gezielte Translationen in (M)ER (z.B. Aufgabe 3: Skizze und Vervollständigung der Reaktionsgleichungen; vgl. A.3.1.3 in Anhang). Ferner ziehen die Instruktionen des Posttests des Öfteren die Anwendung von Symbolen (auf Teilchenebene)

nach sich (vgl. Aufgabe 1 oder 5), die laut Theorie (vgl. Kapitel 2.2) sehr herausfordernd sein kann. Das höhere Aufgabenniveau äußert sich, neben den Formulierungen der Aufgabenstellungen, auch in der Wahl der chemischen Fachinhalte. Mit Blick auf den Anspruch der Elaborationsintensität wurden im Prätest verstärkt zusätzliche Hinweise (z.B. Aufgabe 1 des Prätests: Angabe der Ordnungszahlen; vgl. A.3.1.2 in Anhang) integriert, die die Probanden bei der Zielerreichung unterstützen sollen. Die MC-Aufgabe des Prätests (vgl. Tabelle 45) zeigt beispielsweise sämtliche Prozesse auf Teilchenebene durch Einbindung zahlreicher Symbole mit vollständigen Redoxreaktionen auf. Der Posttest hingegen erwartet einen stärkeren Abruf von Informationen aus dem Gedächtnis (z.B. Aufgabe 3: Fachbegriff und –inhalt: Boudouard-Gleichgewicht; vgl. A.3.1.3 in Anhang). Obgleich der Text in der MC-Aufgabe des Posttests (vgl. Abbildung 36) eine Vielzahl an wesentlichen Informationen beinhaltet, wurde lediglich eine Wortgleichung mit Aggregatzuständen in Symbolschreibweise aufgeführt. Dabei müssen die Versuchspersonen den Transfer von Text in Symbol selbst erkennen, anwenden und erklären. Ferner fordern die fachlich komplexeren Themeninhalte in Aufgabe 1 und 3 des Posttests (laut Experten-Rating) die gezielte Implementation von MER. Damit wird eine dezidierte Auseinandersetzung mit der repräsentativen Ebene intendiert, wodurch sich das Schwierigkeitsniveau der Aufgaben erhöht. Aufgabe 1 des Posttests demonstriert exemplarisch die Strukturformeln des Cyanidins und ermöglicht damit, ausgehend von der Mesomerie, die inhaltliche Diskussion der Absorption, obgleich die Betrachtung der (De-) Protonierungen genüge. Die inhaltliche Verstetigung kann eine tiefgründige Elaboration auf Teilchenebene mittels diverser (M)ER provozieren. Überdies wurde im Zuge des Experten-Ratings deutlich, dass der Umgang mit Strukturformeln im Vergleich zu Summen- oder Ionenformeln aufgrund des erhöhten Abstraktionsgrades herausfordernder sei. Dementsprechend wurde in Aufgabe 1 des Posttests (vgl. Tabelle 45) eine Konstitutionsformel eingebunden, die mediengestalterische Aspekte berücksichtigt.

11.4.3 Lautes Denken

Um die Wirkung von AR auf das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis (s. AV, Tabellen 43 und 44 in Kapitel 11.2 sowie FF₁₂ und FF₃₂ in Kapitel 5.3) und damit verbunden die Konstruktion mentaler Modelle über Redoxreaktionen analysieren zu können, wurde die Methode des Lauten Denkens aus der Kognitionspsychologie angewandt (Ericsson & Simon, 1993). Hierfür wurden die verbalen Äußerungen der Probanden während der Bearbeitung der Testaufgaben (vgl. zwei Etappen – vor und nach Bearbeitung der Lernumgebung, Kapitel 11.5) aufgezeichnet. Durch das Laute Denken können Gedankengänge, Lösungs- und Bearbeitungsstrategien, Vorschläge, Ideen, Wissensinhalte, Gefühle, Wahrnehmungen und Empfindungen von denkenden Versuchspersonen während einer Handlung abgebildet werden (Sandmann, 2014). Mithilfe dieser Forschungsmethode soll eine große Menge an Datenmaterial generiert werden

(Rost, 1998), die einen Zugang zu den Denkprozessen während der Elaboration der Testaufgaben schafft (Sandmann, 2014). Das Laute Denken nimmt demnach die Form der Introspektion als augenblickliche Verbalisierung an (vgl. Konrad, 2010) und sollte eine bestmögliche Verknüpfung zwischen den Denkprozessen und verbalen Äußerungen schaffen (vgl. Ericsson und Simon, 1993). Dabei stellen die verbalisierten Äußerungen differenzierte Beschreibungen der individuellen Informationsverarbeitung dar und entspringen vor allem dem Kurzzeitgedächtnis (Konrad, 2010). Werden anspruchsvolle Aufgaben wie jene aus Kapitel 11.4.1 durchgearbeitet, so kann das spontane Laute Denken wichtige Erkenntnisse über die stattfindenden kognitiven Verarbeitungs- und Denkprozesse im Umgang mit der chemischen Fachsprache auf Stoff- und Teilchenebene liefern. Demnach fordern die Testaufgaben auf, gegebene Testinhalte (gezielt) zu paraphrasieren und internal mit bestehenden Wissensstrukturen in Verbindung zu setzen. Um ein weites Spektrum an Elaborationen anzuregen, wurden die Aufgaben vielfältig hinsichtlich des Anspruchs - ihrer erwarteten Beschreibungen, Erklärungen und Schlussfolgerungen - konzipiert (vgl. Lind et al., 2005) und zielen auf die erfolgreiche Bildung von Inferenzen ab, die den Aufbau einer Textbasis oder visuellen Vorstellung (nach Schnotz, 2001b) sowie den eines Situationsmodells begünstigen (Kintsch, 1993). Daher sind die elaborierenden Testaufgaben maßgeblich für den Informationsgehalt der Protokolle des Lauten Denkens und müssen optimal konzipiert werden (vgl. Kapitel 11.4.2). Die Erhebungsmethode des Lauten Denkens fordert eine angenehme, ruhige Atmosphäre, die ein konzentriertes Arbeiten ermöglicht (Sandmann, 2014). Mit einer Bearbeitungszeit von maximal 90 Minuten sollten sich Ermüdungseffekte bei der Studiendurchführung ausschließen lassen (vgl. Sandmann, 2014). Die Probanden müssen durch einfache Instruktionen zum Lauten Denken aufgefordert werden. Übungsaufgaben vor Elaborationsbeginn eignen sich, um in das Laute Denken einzuführen (vgl. Kapitel 11.5). Indem die aufgezeichneten Verbalisierungen der Probanden transkribiert und im Zuge der Datenverarbeitung systematisch ausgewertet werden (vgl. Sandmann, 2014), kann sich die qualitative Inhaltsanalyse nach Mayring (2010) und eine evidenzbasierte Interpretation des Datenmaterials anschließen (vgl. Konrad, 2010; Lind et al., 2004). Entsprechend wurden die Protokolle des Lauten Denkens hinsichtlich des theoretischen Konstrukts „Denken in den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000)“ einerseits mit dem Kategoriensystem zum Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis und andererseits bei der Hälfte der Probanden mit dem Kategoriensystem zur chemischen Fachsprache ausgewertet (vgl. Sandmann, 2014). Diese Kategoriensysteme werden als Ergebnisse der Hauptstudie 2 in Kapitel 12.1 ausführlich vorgestellt. Die Analyse der Protokolle des Lauten Denkens sollte sodann einen Einblick in die kognitiven Verarbeitungsprozesse gewähren und entsprechend die gebildeten, mentalen Repräsentationen identifizieren, welche vor dem Hintergrund des Forschungsziels von großem Interesse sind (Konrad, 2010). Obgleich die Methode des Lauten

Denkens ein inhaltsreiches Datenmaterial generieren kann und damit speziell für die fachdidaktische Lehr- und Lernforschung von großem Interesse ist, unterliegt sie Einschränkungen. Die Validität der Gedankenprotokollierung ist nicht zwingend sicherzustellen, da die kognitiven Denkprozesse vielleicht nicht ausreichend artikuliert (Konrad, 2010) und folglich nicht alle kognitiven Verarbeitungsprozesse erfasst werden können. Insbesondere automatisierte Lernprozesse werden von Experten vermutlich nicht laut ausgesprochen (Sandmann, 2014). Es muss bedacht werden, dass das Laute Denken anspruchsvoll ist und das simultane Verbalisieren der Gedankengänge die kognitive Leistung negativ beeinflussen kann. In der Folge wird ein geringerer Lern- bzw. Problemlöseerfolg erreicht (Sandmann, 2014). Auch Effekte der sozialen Erwünschtheit sind beim Lauten Denken nicht auszuschließen. Diese Aspekte gilt es bei der Auswertung und Analyse zu berücksichtigen. Um derartige Effekte weitestgehend zu vermeiden und dennoch aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, werden die Analysen zum Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis durch die zusätzliche Auswertung des Umgangs mit (M)ER gestützt.

11.5 Durchführung von Hauptstudie 2

Um das Konzeptverständnis beim Stoff-Teilchen-Ebenenwechsel (AV) über das Elaborationsverhalten der integrierten digitalen Repräsentationsformen bei Chemielehrkräften zu untersuchen, bearbeiteten 60 der insgesamt 157 Versuchspersonen einen Prä- und Posttest (s. Kapitel 11.4.1). Der Ablauf und die Organisation fanden analog zu Hauptstudie 1 statt. Die Prä-Post-Befragung wurde per Lautem Denken im Zuge des Präsenztreffens durchgeführt (vgl. Abbildung 37). Bevor mit der Elaboration per Lautem Denken begonnen werden konnte, wurden alle Versuchspersonen mit der Methode vertraut gemacht. Hierfür gab die Versuchsleitung Handlungsanweisungen, nannte Vorgaben, worauf bei der Bearbeitung der Tests, insbesondere in Bezug auf das Laute Denken, geachtet werden sollte und führte mit den Probanden ein bis drei Aufwärmübungen (u.a. mit Sprechtraining) durch. Nach der digitalen Vorbefragung (ausgegraut in Abbildung 37) und vor der ersten Testbearbeitung erhielten alle Probanden eine Einweisung in die Methode des Lauten Denkens (vgl. Kapitel 11.4.3) und elaborierten anschließend den Prätest mit fünf chemischen Testaufgaben zum Donator-Akzeptor-Konzept (s. Kapitel 11.4). Anschließend wurden je 20 Chemielehrkräfte zufällig einer der drei Lernumgebungen zugewiesen, um diese, weiterhin per Lautem Denken, zu bearbeiten. Die Bearbeitung der jeweiligen Lernumgebung wurde zeitlich nicht beschränkt, und betrug durchschnittlich 30 min, wobei es sich bei 15 min um die kürzeste und 60 min um die längste Bearbeitungszeit handelte. Die Zuordnung der Probanden zu den drei Lernumgebungen fand randomisiert statt. Dabei wurden die Chemielehrkräfte ermutigt, während der selbstgesteuerten Interaktion in der AR- bzw. digitalgestützten Lernumgebung den Demonstrationsversuch (hier: Elektrolyse von Zinkiodid) zu beschreiben, den Versuchsablauf auf Teilchenebene und unter Berücksichtigung der verschiedenen Repräsentationsformen zu erklären (vgl. in Kapitel 8.3.3). Auf diese Art und

Weise sollten sie sich während der Elaboration in der AR- (un-) gestützten Lernumgebung tiefgehend mit den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000; vgl. Kapitel 2.1) auseinandersetzen und im Sprachfluss hinsichtlich des Lauten Denkens bleiben. Analog zur Vorstudie folgte vor der Bearbeitung der Lernumgebung eine technische und methodische Einweisung in die Arbeit mit der Lernumgebung, wodurch die Lehrkräfte mit dem „Handling“ der jeweiligen App, auf dem Tablet oder auf der AR-Brille praktisch vertraut gemacht wurden (vgl. Hauptstudie 1 in Kapitel 8.5). Bevor die Versuchspersonen an der digitalen Abschlussbefragung teilnahmen (ausgegraut in Abbildung 37) bearbeiteten sie den Posttest mit fünf chemischen Testaufgaben zum Donator-Akzeptor-Konzept (s. Kapitel 11.4.1). Während die Elaboration des Prätests durchschnittlich 40 Minuten dauerte, verkürzte sich die Bearbeitungszeit des Posttests auf ca. 30 Minuten. Zu beiden Messzeitpunkten konnten neben den mündlichen Aussagen schriftliche Notizen angefertigt werden, die die Elaborationen untermauern und für die Auswertung dienlich sein können. Es wurde darauf geachtet, dass die Bearbeitung von Prä- und Posttest in einer ruhigen und konzentrierten Atmosphäre vorzugsweise am Vormittag bzw. direkt nach Schulschluss stattfand. Die Versuchsperson fungierte damit während der Elaboration der Lernumgebung als einzige Variationsquelle und wurde während der gesamten Testbearbeitung von der Versuchsleitung nicht beeinflusst. Dieses Vorgehen sollte der Standardisierung dienen (Moosbrugger & Kelava, 2012).

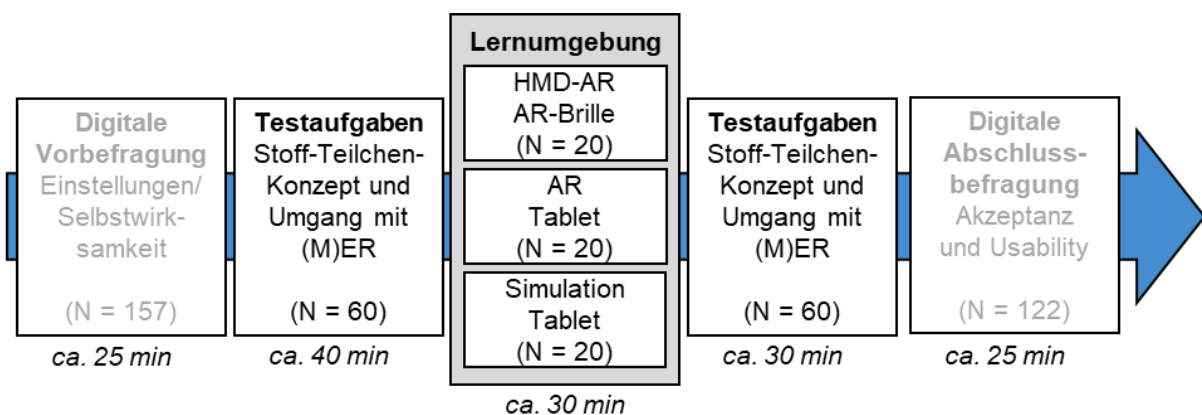


Abbildung 36. Durchführung und Ablauf der Datenerhebung mit Fokus auf Hauptstudie 2: Erfassung des Stoff-Teilchen-Konzeptverständnisses und Umgangs mit (M)ER sowie Bearbeitung einer der drei Lernumgebungen.

11.6 Auswertungs- und Analysemethoden

Für die Operationalisierung der abhängigen Variable AV (vgl. Tabellen 43 und 44 in Kapitel 11.2) wurden die Testaufgaben aus Prä- und Posttest mit ihren zusätzlichen, schriftlichen Notizen (falls vorhanden) per Lautem Denken erhoben. Um die Daten beider Messzeitpunkte qualitativ nach Mayring (2010) auswerten zu können, wurden die von dem Diktiergerät aufgezeichneten Aussagen mithilfe eines Transkriptionsservices transkribiert (Bortz & Döring, 2006). Demzufolge wurden 120 Transkripte erstellt, die anschließend mit dem Auswertprogramm MAXQDA (VERBI Software, 2022), unter Zuhilfenahme zweier Kategoriensysteme,

systematisch kategorisiert wurden (Mayring, 2010). Die Protokolle des Lauten Denkens wurden mit qualitativer Inhaltsanalyse nach Mayring (2010) bis zur vollständigen Validierung des jeweiligen Kategoriensystems, in zyklischen Prozessen aus Inter-Rater-Vergleichen, ausgewertet. Diese Daten wurden dann für die Analyse der mentalen Verarbeitungsprozesse verwendet. Aufgrund der erwarteten Effekte in den drei Vergleichsgruppen (vgl. Kapitel 5.3) und der gewählten Forschungsmethode sollte sich, wie in der fachdidaktischen Forschung erwünscht, ein weites Spektrum an informativen Daten aufzeigen (vgl. Rost, 1998). Demnach wurden zwei umfangreiche, detaillierte Kategoriensysteme theoriegeleitet entwickelt, die anschließend induktiv am Datenmaterial angepasst wurden (vgl. Rost, 1998). Mit Blick auf die Forschungsfragen FF1₂, FF2₂, FF3₂ und FF4₂ wurde ein Kategoriensystem zum Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis und ein weiteres zur chemischen Fachsprache konzipiert (vgl. Kapitel 12.1). Die deduktive Kategorienbildung erfolgte in Anlehnung an das Kategoriensystem zum Einfluss des Vorwissens auf die Intensität und Qualität des Selbsterklärens beim Lernen mit biologischen Beispielaufgaben von Kroß und Lind (2001) und den Kategoriensystemen zum Beispiellernen und Problemlösen von Lind et al. (2004) sowie Sandmann et al. (2002). Überdies wurden die Kategorien vor der Auswertung theoriegeleitet hinsichtlich des Denkens in den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) festgesetzt (Mayring, 2010). Einerseits wurde die Verwendung von Stoff- und Teilchenebene unter Berücksichtigung deren Wechsel ineinander fokussiert (vgl. Johnstone, 1993, 2000). Andererseits sollten die Kategorien auf den Umgang mit (M)ER in Hinblick auf die Informationsentnahme, konstruktionsnahe Integration und die Translation abzielen (vgl. Beck & Nerdel, 2015; Kozma & Russell, 2005; Ainsworth, 1999). Dabei stellen die Kategorien Variablenausprägungen dar. Die Codierungen sind Sinneinheiten, welche im Zuge der Auswertung als Textstellen aus den Transkripten den jeweiligen Kategorien zugewiesen werden (Bortz & Döring, 2006). Durch die Unterschiede in Anzahl, Ausprägung und Inhalt der Codierungen können Typisierungen bezüglich des Lauten Denkens identifiziert werden (vgl. Kroß & Lind, 2005). Auf Basis dieser Datenanalyse konnten danach die finalen Kategoriensysteme (s. Kapitel 12.1), ergänzt um die induktiv aus dem Datenmaterial gewonnenen Kategorien, erstellt werden (Mayring, 2010; Bortz & Döring, 2006). Die Generierung der Kategorien aus dem Datenmaterial ist als wesentliches Merkmal der qualitativen Analyse anzusehen (Rost, 1998). Weiterhin galt es die Kategorien eindeutig zu definieren und mit Ankerbeispielen zu belegen (vgl. Bortz & Döring, 2006). Die Äußerungen der Protokolle des Lauten Denkens konnten sodann durch Bildung von Sinnabschnitten von einem Rater den einzelnen Kategorien zugeordnet werden. Dabei wurden in sich abgeschlossene und nachvollziehbare Gedankenschritte in Form von Wörtern, Sätzen oder Textabschnitten als Analyseeinheit betrachtet und im möglichst niedrig inferenten Verfahren disjunkt einer Kategorie zugeordnet (vgl. Lotz et al., 2013). Ferner wurde eine Reliabilitätsanalyse für die Verwendbarkeit der inhaltsanalytischen Kategoriensysteme durchgeführt (vgl. Bortz & Döring,

2016). Hierfür wurde ein weiterer Rater hinzugezogen, der an einer Kodierer-Schulung teilnahm (vgl. Bortz & Döring, 2016). Beide Kodierer sollten nach unabhängiger Auswertung des Datensatzes zu möglichst gleichen Kategorisierungen kommen und damit, wie von Wirtz und Caspar (2002) empfohlen, die Güte der Beurteilung sicherstellen. Zu diesem Zweck wurden 10 – 20 % des Datenmaterials durch zwei unabhängige Rater doppelt codiert (Bortz & Döring, 2016). Um die Eignung der Kategorisierung einzuschätzen, kann die Inter-Kodierer-Reliabilität mithilfe des Cohens Kappa-Koeffizienten κ als Maß der prozentualen Übereinstimmung der verschiedenen Rater über alle Kategorien hinweg ermittelt werden. Kappa-Werte über .75 werden als sehr gut, zwischen .75 und .60 als gut und zwischen .60 und .40 als ausreichend angesehen (Döring & Bortz, 2016). Es schloss sich eine Datenaggregation mittels quantitativer Codierung der (Haupt-) Kategorien (Dorsch et al., 2013), gefolgt von einer fallbasierten, qualitativen Inhaltsanalyse, an. Häufigkeitsanalysen liegen dem verwendeten niedrig inferenten Verfahren nach der Codierung zugrunde, wohingegen die kodierten Statements selbst eine hohe Inferenz aufweisen. Werden niedrig- und hochinferente Verfahren miteinander kombiniert, so können die Ergebnisse gegenseitig validiert werden und einen umfassenden Einblick in das Elaborationsverhalten geben (vgl. Lotz et al., 2013). Demnach sollten durch die Quantifizierung der Merkmalsausprägungen übergeordnete Trends in den Gruppen erkennbar werden, welche die prototypischen und spezifischen Fallauswertungen der individuellen Merkmalprofile der Testpersonen ergänzen. (s. FF1₂ und FF3₂, Kapitel 5.3).

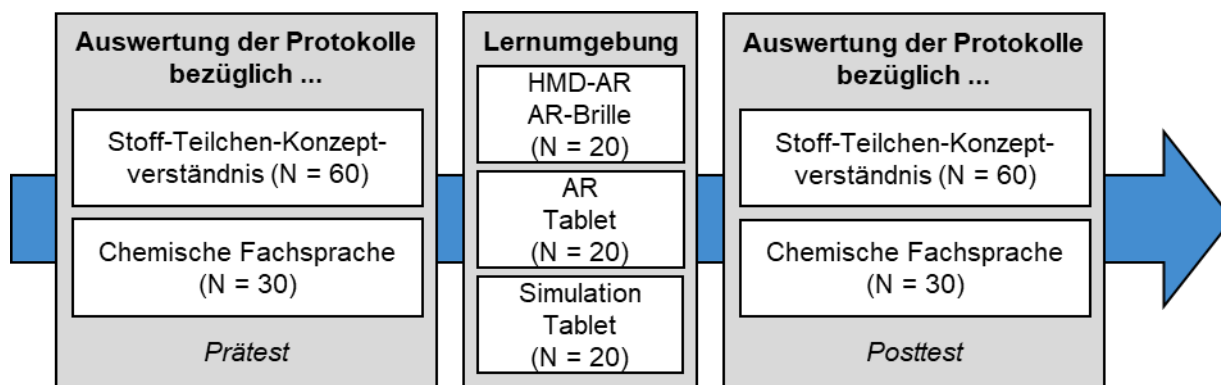


Abbildung 37. Übersicht zur Auswertung der Protokolle des Lauten Denkens bezüglich des Stoff-Teilchen-Konzeptverständnisses und der chemischen Fachsprache.

Alle 60 Transkripte wurden hinsichtlich der Stoff- und Teilchenebene kategorisiert (vgl. Abbildung 38). Zusätzlich wurden, wenn vorhanden, die schriftlichen Notizen aus den Testbearbeitungen unterstützend für die Codierungen der Analyseeinheiten verwendet. Die Daten zur Erfassung des Stoff-Teilchen-Konzeptverständnisses sollten durch die Analyse der Protokolle des Lauten Denkens hinsichtlich des Umgangs mit den (M)ER als zweite Datenquelle validiert werden. Da die chemische Fachsprache eng verzahnt mit dem Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis ist (vgl. Kapitel 2), wurde demnach die Hälfte aller Transkripte (je Vergleichsgruppe: N = 10) zusätzlich mit dem Kategoriensystem zur chemischen Fachsprache ausgewertet (vgl.

Abbildung 38). Indem die Resultate aus beiden Inhaltsanalysen kombiniert wurden, sollten die tiefgehenden Elaborationsprozesse hinsichtlich des Denkens in den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) vor und nach dem Treatment aufgedeckt werden.

11.6.1 Vorgehen bei der Kategorienentwicklung

Mit Blick auf die Validität musste sowohl bei der theoriebasierten als auch bei der datenbasierten Kategorienentwicklung darauf geachtet werden, dass die inhaltlichen Merkmale zum Umgang mit (M)ER auf Stoff- und Teilchenebene bei der Auswertung und Analyse der Protokolle des Lauten Denkens vollständig erfasst werden. Orientiert an den Forschungsfragen (vgl. FF1₂ bis FF4₂ in Kapitel 5.3) wurden daher deduktiv zwei Kategoriensysteme erstellt, in welchen die drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) verarbeitet wurden (vgl. Bortz & Döring, 2016). Die deduktive Kategorienentwicklung orientiert sich im ersten Schritt an Kroß und Lind (2001), Lind et al. (2004) sowie Sandmann et al. (2002) mit sieben Hauptkategorien und wurde im nächsten Schritt, orientiert an Johnstone (1993, 2000), Beck und Nerdel (2015), Kozma und Russell (2005) sowie Mayer und Fiorella (2021), theoriegeleitet weiterentwickelt. Folglich wurden die sieben Hauptkategorien mittels weiterer Unter- und Subkategorien sowie Taxonomien deduktiv für das Denken in den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) ausgebaut. Auf dieser Grundlage schloss sich die detaillierte Anfertigung von Kategoriensystem 1 zum Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis (KAT 1) sowie in analogem Vorgehen von Kategoriensystem 2 zur chemischen Fachsprache (KAT 2) an. Dabei lag der Fokus speziell auf den ersten vier Kategorien von Kroß und Lind (2001), welche auf die Art der Wissensbereitstellung unter Berücksichtigung der Schwerpunktextraktion abzielen. Entsprechend wurden in KAT 2 die Kategorien 5 bis 7 nicht mehr aufgeführt, da sie keine konkreten Aussagen zum Umgang mit (M)ER liefern und das gesamte Datenmaterial bereits mittels KAT 1 auf diesen Ebenen klassifiziert wurde. Die theoretische Ableitung und Erläuterung der Kategorien wurde mit Fachdidaktik-Experten ausgiebig kommunikativ validiert, indem die Kategorisierungen auf ihre Anwendbarkeit evaluiert wurden. Hierfür fand mit der Versuchsgruppe aus der Pilotstudie ein Probedurchlauf statt, auf dessen Basis 36 Testbearbeitungen mittels beider Kategoriensysteme ausgewertet wurden. Dabei wurden 28 % des Datenmaterials von zwei unabhängigen Ratern doppelt codiert. Die Interrater-Reliabilität lag mit $\kappa > .90$ für beide Kategoriensysteme in einem hervorragenden Bereich, sodass die Kategoriensysteme für die Hauptstudie genutzt werden konnten. Diese Datenauswertungen waren jedoch nicht Gegenstand der Forschung. Sie sollten lediglich die Kategorienentwicklung durch ein Beispielmaterial, das aufgrund der unabhängigen Stichprobe nicht zu Hauptstudie 2 gehört, validieren (vgl. Bortz & Döring, 2016). Die evidenzbasierte Selektion der Hauptkategorien für KAT 1 und KAT 2 wird nachstehend näher beleuchtet:

Kategorie 1: Hinzufügen von Wissenselementen durch Abruf zugehörigen Wissens aus dem Gedächtnis und Kategorie 2: Vergeblicher Abruf von Information aus dem Gedächtnis

Auf Grundlage der Kategorie *Hinzufügen von Wissen durch Abruf zugehörigen Wissens* von Kroß und Lind (2001) ließen sich zwei Hauptkategorien ableiten, welche sich auf dem Begriff des „suchorientierten Lernens“ nach Schmalhofer (1996) stützen. Dabei subsumieren sie Äußerungen, die auf den erfolgreichen oder vergeblichen Abruf von Vorwissen zurückzuführen sind. Entsprechend kann die Testperson versuchen Wissen zu den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) aus dem Gedächtnis zu rekonstruieren und mithilfe externer Informationsquellen in Form von Text oder Symbol neu zu bilden. Auch kann es sich bei Kategorie 1, neben dem wiederholten Lesen und Nachschlagen von gegebenen (M)ER, um den Abruf von Informationen aus anderen Aufgaben handeln. Folglich ist zu unterscheiden, ob die Inhalte aus der gerade oder vorherigen behandelten Aufgabe stammen. Ferner schließt die erste Hauptkategorie das Suchen von Beziehungen zwischen den in der Aufgabe dargestellten Texten und Symbolen auf Stoff- und Teilchenebene ein, welches durchaus missglücken kann. Wohingegen die Äußerungen bezüglich des Wissensabrufs und der Suche nach Beziehungen aus bzw. mit dem Vorwissen eine Ausdifferenzierung hinsichtlich Stoff- und Teilchenebene erlauben, ist eine Konkretisierung auf repräsentativer Ebene höchstwahrscheinlich nicht möglich. Stattdessen wird beim Umgang mit (M)ER vermutet, dass der Wissensabruf bzw. die Suche entweder auf den Texten bzw. Symbolen der Aufgaben oder den Inhalten der AR-Lernumgebung beruht. Scheitert die Testperson bei der bewussten Konstruktion aus dem Vorwissen, so wird die zweite Kategorie fokussiert. Hier wurden Probandenäußerungen codiert, die die Suche nach Informationen aus dem Langzeitgedächtnis betonen, jedoch mit einer erfolglosen Wissensrekonstruktion verbunden sind. Mit Kategorie 2 sollten Statements zum vergeblichen Abruf von Fachbegriffen, Summenformeln, Strukturformeln, Verbindungsnamen etc. auf Stoff- und Teilchenebene aus dem Gedächtnis codiert werden können. Jedoch wird erwartet, dass sich die (M)ER, auf die die Versuchsperson zuzugreifen versucht, nicht eindeutig identifizieren lassen. Erfolgt der Wissensabruf vergeblich, so kann sich dieser auf verschiedenste (M)ER stützen. Sucht ein Proband exemplarisch zum Thema „Elektronenabgabe“ nach Vorwissen, wird gegebenenfalls schwer erkennbar sein, ob er sich auf Fachbegriffe wie „Reduktion“ oder die Symbolschreibweise mit „e“ auf der Produktseite fokussiert, da er eben jene (M)ER nicht konstruiert und die repräsentative Ebene nicht zwingend erklärt. Zwar wird erwartet, dass mittels KAT 1 der vergebliche Abruf hinsichtlich des Umgangs mit Stoff- und Teilchenebene erfasst werden kann. Eine Auswertung mit KAT 2 zeigt sich aber nicht zweckdienlich, weswegen bezogen auf die Analysen zur chemischen Fachsprache auf Kategorie 2 verzichtet wird.

Kategorie 3: Hinzufügen von Wissen durch Wissenserzeugung mittels (logischer) Inferenzen

Wesentliche Klassifikationsmerkmale dieser Kategorie sind, in Anlehnung an die Taxonomie der Inferenzen beim Textverstehen nach Kintsch (1993) und im Anschluss an Guthke und Beyer (1992), der Aufbau einer Textbasis und eines Situationsmodells (vgl. Kroß & Lind, 2001; Lind et al., 2004). Gemäß des „verstehensorientierten Lernens“ nach Schmalhofer (1996) differenziert die Anwendung dieser Art von Elaboration zwischen dem „oberflächlichen“ und „tiefen“ Verstehen (vgl. Lind et al., 2004). Demnach sind für die Prozesse des oberflächlichen Verstehens Inferenzen charakteristisch, die neben dem Aufbau einer Textbasis auch den Aufbau einer visuellen Vorstellung beinhalten (vgl. integratives Modell des Text-Bild-Verstehens nach Schnotz, 2001 in Kapitel 3.3). Sie stützen sich auf den externen Darstellungsformen *Text* bzw. *Symbol* der Stoff- und Teilchenebene und schließen folglich das Paraphrasieren, Herstellen von Beziehungen sowie Beschreiben von Lösungswegen vor dem Hintergrund des Denkens in den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) ein (vgl. Lind et al., 2004). Mit ihnen wird das „tiefe“ Verstehen eingeleitet, welches auf Inferenzen abzielt, die die abgebildeten (M)ER auf Stoff- und Teilchenebene (vgl. Kroß & Lind, 2001) in das eigene Vorwissen integrieren (van Dijk & Kintsch, 1983). Dies wiederum führt sodann zur selbständigen Konstruktion eines Situationsmodells (vgl. Lind et al., 2004). Angesichts dessen sollen während der Elaboration Lösungsstrategien mittels Triplet-Beziehung nach Johnstone (1993, 2000) aufgedeckt werden, die sich auf Schlussfolgerungen, Ergebnissen, selbsterstellten Teilproblemen oder Diagnosen eigener Fehler stützen (vgl. Unterkategorien nach Kroß & Lind, 2001). Die Einordnungen selbst müssen nicht zwingend Aufschluss über die Richtigkeit des Denkens in den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) geben. Sie können lediglich demonstrieren, mit welchen Ebenen in welchem Zusammenhang gearbeitet wurde, und, ob die Elaborationen tendenziell auf dem „suchorientierten Lernen“ oder „verstehensorientierten Lernen“ (vgl. Schmalhofer, 1996) fußen. Erst durch eine ergänzende fallbasierte qualitative Inhaltsanalyse der Probandenaussagen können die Wirkungen von AR auf das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis detailliert aufgezeigt werden.

Im Folgenden werden die deduktiven Subkategorienentwicklungen von KAT 1 (vgl. Tabelle 46) und KAT 2 (vgl. Tabelle 47) exemplarisch an Kategorie 3.1 *Inferenzen, die dem Aufbau einer Textbasis dienen* aufgezeigt:

Tabelle 46. Deduktive Kategorienentwicklung von KAT 1 zur Stoff- und Teilchenebene, exemplarisch demonstriert an Kategorie 3.1. Inferenzen, die dem Aufbau einer Textbasis oder visuellen Vorstellung (nach Schnotz, 2001) dienen unter Berücksichtigung der ursprünglichen und neuen Kategorie sowie der vorgenommenen Änderungen.

Deduktive Entwicklung von 3.1 Inferenzen (Aufbau einer Textbasis oder mentalen Vorstellung) mit Einfluss auf das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis		
<i>Ursprüngliche Kategorie</i>	<i>Neue Kategorie</i>	<i>Änderung</i>
3.1.1 Paraphrasierungen zw. Alltags- und Fachsprache	3.1.1 Paraphrasierungen in Stoff- oder Teilchenebene 3.1.1.1 Von ER auf Teilchenebene 3.1.1.2 Von ER auf Stoffebene	Umformulierung/ neuer Bezug Ausdifferenzierung für Subkategorien
3.1.2 Herstellen v. Beziehungen zw. untersch. Information	3.1.2 Herstellen von Beziehungen zw. Stoff- und Teilchenebene	Umformulierung/ neuer Bezug
3.1.3 Lösungswege beschreiben	3.1.3 Lösungswege beschreiben 3.1.3.1 Teilchenebene wählen 3.1.3.2 Stoffebene wählen 3.1.3.3 Teilchenebene anwenden 3.1.3.4 Stoffebene anwenden 3.1.3.5 Stoff- und Teilchenebene anwenden	neuer Bezug Ausdifferenzierung für Subkategorien

In KAT 1 wurden Bezüge zu Stoff- und Teilchenebene hergestellt, indem die Subkategorien (vgl. Tabelle 46) umformuliert, sprachlich ausgebaut und entsprechend ausdifferenziert wurden. Dabei wurden Stoff- und Teilchenebene stets getrennt betrachtet und zum Teil, wenn sinnvoll, ihre Wechsel sowie Verknüpfungen miteinander (vgl. Kategorie 3.1.2 in Tabelle 46) fokussiert. Demnach wurden beispielsweise in 3.1.1 zwei Subkategorien integriert, die das Paraphrasieren von gegebener Repräsentationsform auf Teilchenebene sowie Stoffebene fokussieren, wobei die Unterscheidung zwischen Text und Symbol hierbei irrelevant ist. Dabei kann es sich um eine bewusste schriftliche oder mündliche Umschreibung der in der Aufgabe gegebenen Inhalte handeln, indem die Versuchsperson explizit die Stoff- oder Teilchenebene nennt. Andererseits sind Aussagen denkbar, die durch die Darstellung von Teilchenprozessen, beispielsweise in Ionenschreibweise, oder aufgrund der Nennung von stofflichen Eigenschaften, beispielsweise die Farbigkeit, konkret eine der beiden Ebenen adressieren. Auch Kategorie 3.1.3 verdeutlicht, dass sich das tiefe Verstehen in Hinblick auf die Beschreibung der Lösungswege beim Stoff-Teilchen-Ebenenwechsel weitgefächert gestalten kann. Daher wurde zwischen der Wahl und der eigenständigen Anwendung von Stoff- und Teilchenebene unterschieden.

Analog zur Ausdifferenzierung der Kategorien bezüglich Stoff- und Teilchenebene wurden in KAT 2 Subkategorien zum Umgang mit (M)ER (vgl. Tabelle 47) konzipiert.

Tabelle 47. Deduktive Kategorienentwicklung von KAT 2 zum Umgang mit (M)ER, exemplarisch demonstriert an Kategorie 3.1. Inferenzen, die dem Aufbau einer Textbasis oder visuellen Vorstellung (nach Schnotz, 2001) dienen unter Berücksichtigung der ursprünglichen und neuen Kategorie sowie der vorgenommenen Änderungen.

Deduktive Entwicklung von 3.1 Inferenzen (Aufbau einer Textbasis oder mentalen Vorstellung) mit Einfluss auf den adäquaten Umgang mit (M)ER		
<i>Ursprüngliche Kategorie</i>	<i>Neue Kategorie</i>	<i>Änderung</i>
3.1.1 Paraphrasierungen zw. Alltags- und Fachsprache	3.1.1 Paraphrasierungen zwischen verschiedenen ER 3.1.1.1 aus Text in Text 3.1.1.2 aus Text in Symbol 3.1.1.3 aus Text in Bild 3.1.1.4 aus Symbol in Text 3.1.1.5 aus Symbol in Bild	Umformulierung/ neuer Bezug Ausdifferenzierung für Subkategorien
3.1.2 Herstellen v. Beziehungen zw. untersch. Information	3.1.2 Herstellen von Beziehungen zwischen Text und Symbol	Umformulierung/ neuer Bezug
3.1.3 Lösungswege beschreiben	3.1.3 Lösungswege beschreiben 3.1.3.1 Text wählen 3.1.3.2 Symbol wählen 3.1.3.3 Text-Symbol wählen 3.1.3.4 Text anwenden 3.1.3.5 Symbol anwenden 3.1.3.6 Bild anwenden 3.1.3.7 Symbol-Bild anwenden 3.1.3.8 Text-Symbol anwenden 3.1.3.9 Text-Bild anwenden 3.1.3.10 Text-Symbol-Bild anwenden	neuer Bezug/ Ausdifferenzierung für Subkategorien

Da der Umgang mit den (M)ER gänzlich erfasst werden soll (vgl. Kapitel 3.1), musste KAT 2 tiefgehend in das Text-Bild-Verständnis (vgl. Kapitel 3) eintauchen. Paraphrasierungen zwischen Alltags- und Fachsprache wie bei Kroß und Lind (2001) oder Sandmann et al. (2002) reichten in Hinblick auf die Zielgruppe nicht aus. Aktive Chemielehrkräfte sind mindestens wegen ihres Studiums und durch ihre Berufserfahrung, als Experten hinsichtlich der Redox- und Säure-Base-Reaktionen einzustufen. Aufgrund ihrer Profession sollten sich facettenreiche, fachsprachliche Ausdruckweisen offenbaren, die es mit Blick auf die Informationsentnahme, konstruktionsnahe Integration und den Translationen aus mehreren Repräsentationen (vgl. Beck, 2017) aufzudecken gilt. Entsprechend zeigt Tabelle 47 exemplarisch an Kategorie 3.1 auf, dass die Subkategorien auf den gegebenen Texten und Symbolen der Testaufgaben fußen und beliebige Anwendungen von (M)ER nach sich ziehen können. Dabei schließen, orientiert an Kapitel 3, Texte Fachbegriffe, Trivial- oder Verbindungsamen ein. Zu den Symbolen zählen die verschiedenen Elementsymbole, Koeffizienten, Phasensymbole und Formeltypen wie Struktur-, Partikel- oder Summenformeln usw. Da die Aufgaben Übersetzungsleistungen

in Text, Symbol oder auch Bild fordern, können mit Kategorie 3.1.1 Paraphrasierungen ausgehend von Text oder Symbol in Text, Symbol oder Bild codiert werden (vgl. Tabelle 47). Überdies wurde Kategorie 3.1.2 zum Herstellen von Beziehungen so umformuliert, dass eine Konzentrierung auf die gegebenen Repräsentationen Text und Symbol ersichtlich wurde. Auch das Beschreiben der eigenen Lösungswege (vgl. Kategorie 3.1.3 in Tabelle 47) konnte sich auf der Wahl von Text oder Symbol stützen und wurde dahingehend ausdifferenziert. Dabei war es denkbar, dass die Versuchspersonen für die Erläuterungen zur Lösungsfindung auch explizit auf MER zurückgreifen.

Ferner fokussiert Kategorie 3 Inferenzen, die über die in der Aufgabe gegebenen Inhalte und folglich das Denken in den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) hinausgehen, wie zum Beispiel Bemerkungen zum methodischen Vorgehen, Zweifel an den externen Wissensquellen oder inhaltliche Bewertungen der gegebenen Repräsentationen (vgl. Kroß & Lind, 2001; Sandmann et al., 2002). Zahlreiche Äußerungen dieser Kategorie sollten, da sie per se nicht an der Triplet-Beziehung anknüpfen, bereits mit KAT 1 zum Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis codiert worden sein. Folglich wurde KAT 2 zur chemischen Fachsprache um jene Kategorien reduziert.

Kategorie 4: Reduktion von Detailwissen durch Streichung

Die Kategorie zur Reduktion von Detailwissen beabsichtigt die Schwerpunktextraktion. Dabei sollte nach Kroß und Lind (2001) eine Informationsauslese aus der gegebenen Datenbasis erfolgen, indem unerhebliche Details gestrichen und infolgedessen als unwichtig konstatiert werden. In der Auswertung sollten diese Codierungen scharf begutachtet werden, da sie sich auf die Lösungsentwicklungen auswirken und folglich Stärken und Schwächen hinsichtlich des Denkens in den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) begründen können (vgl. Kroß & Lind, 2001). In der vorliegenden Forschungsarbeit wurden den Testpersonen weder längere wissenschaftliche Lehrtexte noch Sequenzen für das Beispiellernen bereitgestellt. Infolgedessen ist das Streichen von Detailwissen zwar möglich und nicht zu vernachlässigen, wird aber vermutlich stärker in den Hintergrund rücken (vgl. Kroß & Lind, 2001). Dieser Kategorie sollten daher vorrangig Äußerungen zugewiesen werden, die explizite Schwerpunktsetzungen bestimmter Inhalte zu den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) in Form von Zusammenfassungen oder Zieldefinitionen deutlich machen. Mittels Verallgemeinerung und Reduktion verschiedener, gegebener Informationen sollte der Lernprozess vorwissensbasiert gelenkt und nicht durch unnötige Informationen gestört werden (vgl. Kroß & Lind, 2001; Lehtinen, 1992). KAT 1 fokussiert daher in den Subkategorien sowohl Stoff- und Teilchenebene für sich als auch ihre Wechsel ineinander. KAT 2 differenziert in den Schwerpunktsetzungen zwischen (M)ER, wobei es sich als komplex erweisen sollte die Detailreduktion von MER herauszufiltern.

Entsprechend betrachtet diese Kategorie Text bzw. Symbol gesondert ohne die Verknüpfung zu MER.

Kategorie 5: Oberflächenelaboration, Kategorie 6: Monitoring Statements und Kategorie 7: Restkategorie

Die Kategorien 5 bis 7 subsumieren formale, organisatorische oder emotionale Statements. Zwar nehmen sie keinen Bezug zur Triplet-Beziehung nach Johnstone (1993, 2000), dennoch sollten sie in der qualitativen Forschung nicht vernachlässigt werden (vgl. Bortz & Döring, 2006). Demnach kann es sich um oberflächliche Bearbeitungsmuster (vgl. Kategorie 5) wie dem systematischen Strukturieren der gegebenen Repräsentationen oder allgemeinen Inhaltzusammenfassungen handeln. Überdies werden diesen Kategorien Aussagen des (Miss-) Verständnisses, Erstaunens, Interesses oder der Freude zugewiesen. Entsprechend umfasst Kategorie 6 beobachtbare Verhaltensweisen. Der Restkategorie werden Statements ohne inhaltlichen Tiefgang zugeordnet, beispielsweise Wiederholungen von bereits Gesagtem.

Die Kategorien *Antizipatorische Beispielbearbeitung* und *Reduktion von Wissen durch Erzeugung neuen Wissens* von Kroß und Lind (2001), fanden in Hauptstudie 2 keinerlei Anwendung, da weder Beispieltex te eingesetzt wurden noch das analogiebasierte Lernen fokussiert wurde (vgl. Kroß & Lind, 2001). Im Anhang (s. Kapitel A.3.2; Tabelle A21) findet sich eine detaillierte Aufschlüsselung der deduktiven Kategorienentwicklungen, die die Anzahl der Subkategorien für alle Klassifizierungen mit ihren ursprünglichen Hauptkategorien nach Kroß und Lind (2001) demonstriert. Die deduktiven Konstruktionen der Haupt- und Subkategorien von KAT 1 und KAT 2 (vgl. vollständiges KAT 1 und KAT 2 in den Tabellen A.19 und A.20 im Anhang A.3.2) bildeten die Grundlage für die induktive Kategorisierung und die resultierenden Kategoriensysteme zum Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis und zur chemischen Fachsprache, welche als Ergebnisse von Hauptstudie 2 in Kapitel 12.1 ausführlich (mit Ankerbeispielen) beschrieben werden.

11.6.2 Statistische Analysemethoden

Ergänzend zur quantitativen und qualitativen Inhaltsanalyse der Kategorisierungen mit zwei Kategoriensystemen (s. Kapitel 11.6.1 und Kapitel 12.1) wurden die Testbearbeitungen der beiden Messzeitpunkte mittels Punktevergabe bewertet. Ziel der Punktevergabe war es die Testbearbeitungen als Ergebnisse mithilfe der Musterlösungen (vgl. Anhang A.3.1.4 und A.3.1.5) qualitativ zu beurteilen und die Veränderungen von ersten auf zweiten Messzeitpunkt quantitativ zu beschreiben. Dabei stand die Untersuchung des Umgangs mit der Stoff- und Teilchenebene im Vordergrund. Ferner sollten die Testbearbeitungen hinsichtlich der Verwendung von (M)ER evaluiert werden. Nachdem sich die Aufgabeninhalte an dem Donator-Akzeptor-Konzept orientieren, galt es auch das Fachwissen als Kontrollvariable zu betrachten.

Entsprechend wurde jede der fünf Aufgaben des Prä- bzw. Posttests in Hinblick auf das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis, den Umgang mit der chemischen Fachsprache und das Fachwissen mittels Punktesystem von 0 bis 2 (0 = falsch, 1 = teilweise richtig, 2 = richtig) qualitativ eingestuft. Die Aufsummierung der Punktevergaben über alle Aufgaben eines Tests hinweg ergab dann mögliche Werte von 0 bis 10. Um die Eignung der Punktevergabe einzuschätzen und eine reliable sowie objektive Bewertung sicherzustellen, wurde ein weiterer Rater hinzugezogen, der 15 % des Datenmaterials doppelt bewertete. Hierfür wurde der gewichtete Cohens Kappa-Koeffizient κ_w als Maß für die prozentuale Übereinstimmung aller Aufgabenbewertungen verwendet. Es wurde ein κ_w -Wert von .71 erreicht, der als gut angesehen werden kann (Döring & Bortz, 2016). Die deskriptive Analyse veranschaulicht die erreichten Punkteanzahlen des Prä- bzw. Posttests und erlaubt einen ersten Einblick in die Unterschiede zwischen den Messzeitpunkten und den Gruppen. Mithilfe der anschließenden Kovarianzanalyse (vgl. Kapitel 12.4) sollte, unter Berücksichtigung des Vorwissens (= Prätest), die Qualität des bearbeiteten Posttests, aufgedeckt werden. Die Ergebnisse wurden sodann mit den vorangehenden Datenanalysen kombiniert, um schließlich die Veränderungen hinsichtlich des Denkens in den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) umfassend zu diagnostizieren und die Forschungsfragen FF1₂ bis FF4₂ aus Kapitel 5.3 beantworten zu können. Es wird jedoch angemerkt, dass kein Leistungszuwachs gemessen wurde. Selbst wenn das Datenmaterial auf Grundlage der deskriptiven Analysen auf einen Effekt des Treatments hinweisen sollte, die unterschiedlichen Tests zu Messzeitpunkt 1 und 2 mit nur zwei Ankeraufgaben lassen keinen Prä-Post-Vergleich zu. Infolgedessen können die Veränderungen des Elaborationsverhaltens nicht auf Signifikanz geprüft werden (vgl. Cohen, 1988; Bortz & Döring, 2016).

12 Ergebnisse Hauptstudie 2

12.1 Finale Kategoriensysteme

Für die Auswertung der Protokolle des Lauten Denkens aus den Bearbeitungen der Testaufgaben (vgl. Kapitel 11.4.1 und 11.4.2) wurden also zwei Kategoriensysteme KAT 1 und KAT 2 entwickelt, die nachstehend als Teil der Forschungsergebnisse mit ihren induktiven Anpassungsprozessen vorgestellt werden. Dabei konnten die deduktiv konzipierten Hauptkategorien aus Kapitel 11.6.1 aus inhaltlicher Perspektive vollends übernommen werden. Es fielen lediglich minimale Änderungen in den Subkategorien an. Beide finalen Versionen können ausführlich, mit Auflistung aller Haupt-, Unter- und Subkategorien und ihren detaillierten Beschreibungen, inklusive exemplarischer Ankerbeispiele, im Anhang A.3.2 (vgl. Kapitel A.3.2.1 und A.3.2.2) eingesehen werden.

12.1.1 Finales Kategoriensystem zum Umgang mit der Stoff- und Teilchenebene mit exemplarischen Belegen

Mit KAT 1 wurden über alle drei Vergleichsgruppen hinweg 10588 Probandenäußerungen kategorisiert, die den 120 Transkripten aus Prä- und Posttest (vgl. Kapitel 11.4.1) entnommen werden konnten. Davon waren 3468, 3375 bzw. 3745 Statements auf die AR-, Simulations- bzw. HMD-AR-Gruppe zurückzuführen. Erwartungsgemäß handelte es sich bei den Codierungen zur Stoffebene um Alltagsbezüge, Beschreibungen zu Versuchen (bzw. Experimenten) oder zu Stoffeigenschaften wie Farben oder Aggregatzustände der Stoffe und die Materialwahl bei Versuchsdurchführungen. Statements zur Teilchenebene zielten, in Anlehnung an die Kapitel 2 und 3, meistens direkt auf Teilchen wie Ionen, Moleküle usw. mit ihren Teilchenprozessen ab und fokussieren entsprechend häufig Reaktionsgleichungen, einschließlich der Oxidationszahlen, Wertigkeiten, Koeffizienten oder Indizes. Die Auswertung aller Transkripte lieferte bereits bei doppelter Codierung von 10 % des Datenmaterials einen Cohens Kappa-Koeffizienten κ von .87. Demnach kann die Inter-Kodierer-Reliabilität als sehr gut eingestuft werden. Dabei konnten in den sieben übergeordneten Hauptkategorien 16 Unterkategorien mit 39 Subkategorien in KAT 1 ermittelt werden. Tabelle 48 listet alle Haupt-, Unter- und Subkategorien mit ihren zugehörigen Änderungsschritten auf. Nachstehend wird jede Hauptkategorie von KAT 1 mit ihren induktiv gewonnenen Unter- und Subkategorien anhand ausgewählter Ankerbeispiele vorgestellt:

Tabelle 48. Übersicht der Haupt- und Unterkategorien von KAT 1 zum Umgang mit der Stoff- und Teilchenebene mit ihren induktiven Kategorienentwicklungen und abschließenden Anzahlen an Subkategorien.

Haupt- bzw. Unterkategorie	Induktive Kategorienbildung des finalen KAT 1 zur Stoff- und Teilchenebene für Hauptstudie 2	Anzahl Subkategorien
1. Hinzufügen v. Wissenselementen d.	Abruf zugeh. Wissens aus Gedächtnis	$\sum = 9$
1.1 Nennung von Wissenselementen, die nicht in der gerade behandelten Aufgabe behandelt werden	Eliminierung von 1.1.2 <i>Aus einer vorherigen Aufgabe aus Stoffebene</i> Posttest: Erweiterung um zwei neue Subkategorien mit Bezug auf Wissensabruf aus der Lernumgebung hinsichtlich Stoff- bzw. Teilchenebene	5
1.2 Suche nach Beziehungen	keine Änderungen	4
1.3 Nachschlagen/nochmals lesen	Eliminierung von Kategorie 1.3	-
2. Vergeblicher Abruf v. Informationen aus dem Gedächtnis (keine Subkat.)		-
3. Hinzufügen von Wissen durch Wissenserzeugung mittels (logisch.) Inferenzen		$\sum = 25$
3.1 Inferenzen (Textbasis/ment. Vor.)	Erweiterung um 4 Subkategorien (s. 3.3)	12
3.2 Inferenzen (Situationsmodell)	keine Änderungen	10
3.3 Weiterführende Inferenzen	Subkategorien 3.3.3 <i>Zweifel an den Inhalten</i> und 3.3.4. <i>Inhaltliche Bewertung des Textes</i> wurden modifiziert: Bezugnahme zu Stoff- und Teilchenebene mit anschließender Einstufung in Unterkategorie 3.1	3
4. Reduktion von Detailwissen durch Streichung		$\sum = 5$
4.1 Zieldefinitionen	keine Änderungen	-
4.2 Schwerpunktsetzungen	keine Änderungen	3
4.3 Detailreduktion	Eliminierung von Subkategorie 4.3.3 <i>Detailreduktion Stoff-Teilchen-E.-Wechsel</i>	2
4.4 Text/Symbolzusammenfassungen	keine Änderungen	-
5. Oberflächenelaboration	keine Änderungen (keine Subkategorien)	-
6. Monitoring Statements	keine Änderungen	$\sum = 4$
7. Restkategorie	Eliminierung von Subkategorie 7.3 <i>Wortgetreue Wiederholung von gesprochenen Text/Symbol</i>	$\sum = 2$

Hauptkategorie 1: Hinzufügen von Wissenselementen durch Abruf zugehörigen Wissens aus dem Gedächtnis

Hauptkategorie 1 besitzt final drei Unterkategorien mit insgesamt neun Subkategorien (vgl. Tabelle 48). Dabei wurde die finale Fassung um drei Subkategorien reduziert. Nachdem im Posttest vermehrt Äußerungen identifiziert werden konnten, die sich auf die Inhalte der bearbeiteten Lernumgebung stützten, wurde zwei neue Subkategorien, die zwischen Stoff- und Teilchenebene differenzieren, ergänzt (vgl. Tabelle 48). Tabelle 49 führt für jede Unterkategorie ein ausgewähltes Ankerbeispiel auf.

Tabelle 49. Ankerbeispiele von Hauptkategorie 1 *Hinzufügen von Wissenselementen durch Abruf zugehörigen Wissens aus dem Gedächtnis* (Kat 1).

Unterkategorie	Ausgewähltes Ankerbeispiel
1.1 Nennung von Wissenselementen, die nicht in der gerade behandelten Aufgabe behandelt werden	„Also allgemein Säuren geben ja Protonen ab. Und Basen nehmen Protonen auf.“ (Kat. 1.1.3.1 Nennung von Vorwissen auf Teilchenebene; Prätest; Proband 8; AR-Gruppe)
1.2 Suche nach Beziehungen	„Ich habe jetzt hier ein Problem, weil hier so...drei steht. Warum drei? Also wir sprechen jetzt von einer Stoffebene, also Schwermetall Quecksilber, auch ein Stoff, also ein Stoff kann Reduktionsmittel sein, finde ich.“ (Kat. 1.2.2 Suche nach Beziehungen auf Stoffebene; Prätest; Proband 2; AR-Gruppe)

Hauptkategorie 2: Vergeblicher Abruf von Vorwissen/Information aus dem Gedächtnis

In Hauptkategorie 2 wurden keine induktiven Anpassungen vorgenommen (vgl. Tabelle 48). Als Single-Kategorie zum vergeblichen Wissensabruf (vgl. Ankerbeispiel in Tabelle 50) besitzt sie keine weiteren Klassifizierungen.

Tabelle 50. Ankerbeispiel von Hauptkategorie 2 *Vergeblicher Abruf von Vorwissen/Information aus dem Gedächtnis* (KAT 1).

Ausgewähltes Ankerbeispiel
„Ah, ich kriege es echt nicht mehr zusammen. Ich habe keine Ahnung, wie ein Hochofen aufgebaut ist.“ (Vergeblicher Abruf ohne Stoff-Teilchen-Bezug; Posttest; Proband 5; AR-Gruppe)

Hauptkategorie 3: Hinzufügen von Wissen durch Wissenserzeugung mittels Inferenzen

Diese Hauptkategorie besitzt drei Unterkategorien mit insgesamt 25 Subkategorien (vgl. Tabelle 48). Nachdem die Versuchspersonen vermehrt Zweifel und inhaltliche Bewertungen der (M)ER bezogen auf Stoff- und Teilchenebene äußerten, sollten die Subkategorien 3.3.3 und 3.3.4. nicht mehr länger als weiterführende Inferenzen (vgl. Kroß & Lind, 2001) diagnostiziert werden. Demgemäß wurden vier Subkategorien aus Unterkategorie 3.3 (vgl. Tabelle 48) in Kategorie 3.1 *Inferenzen, die dem Aufbau einer Textbasis oder mentalen Vorstellung dienen* eingestuft. Sobald die Probandenaussagen einen wertenden Charakter hatten, zielten sie auf die Beschaffenheit von Stoff- oder Teilchenebene ab und ließen sich dem „oberflächlichen Verstehen“ unterordnen. In Tabelle 51 werden exemplarisch drei ausgewählte Ankerbeispiele demonstriert, bei denen die Probanden Beziehungen zwischen Stoff- und Teilchenebene herstellten (Unterkategorie 3.1), logische Schlüsse mittels der beiden Ebenen herleiteten (Unterkategorie 3.2) sowie eigene inhaltliche Fragen an sich selbst stellten (Unterkategorie 3.3).

Tabelle 51. Ankerbeispiele von Hauptkategorie 3 *Hinzufügen von Wissen durch Wissenserzeugung mittels (logischer) Inferenzen* (KAT 1).

Unterkategorie	Ausgewähltes Ankerbeispiel
3.1 Inferenzen (Textbasis/ment. Vor.)	„Die Größe des delokalisierten Elektronensystems beeinflusst dann die Farbe des absorbierten Lichts und damit auch die Farbe des Erscheinungsbildes von diesem Stoff.“ (Kat. 3.1.2 Beziehung zw. Stoff- und Teilchenebene herstellen; Posttest; Proband 60; HMD-AR-Gruppe)
3.2 Inferenzen (Situationsmodell)	„Wenn ich das Ganze jetzt eindampfen würde, dann hätte ich tatsächlich in fester Form das Salz NH_4Cl .“ (Kat. 3.2.1.2 Schlussfolgern auf Stoffebene; Prätest; Proband 2; AR-Gruppe)
3.3 Weiterführende Inferenzen	„Woran erkennen wir, dass es eine Redoxreaktion ist?“ (Kat. 3.2.3 Inhaltliche Frage ohne Stoff-Teilchen-Bezug; Posttest; Proband 20; AR-Gruppe)

Es können sich in 3.1 doppelte Codierung von Probandenaussagen in zwei unterschiedlichen Kategorien finden. Obgleich prinzipiell möglichst disjunkte Kategorisierungen vorgenommen wurden, können Codings, beispielsweise aus Kategorie 3.1.3 zur Wahl einer Ebene, auch die Anwendung einer Ebene für die Lösungswegebeschreibungen umfassen und folglich „doppelt“ kodiert werden.

Hauptkategorie 4: Reduktion von Detailwissen durch Streichung

Dieser Hauptkategorie wurden vier Unterkategorien mit fünf Subkategorien zugewiesen, wobei zwei davon Single-Kategorien darstellen (vgl. Tabelle 48).

Tabelle 52. Ankerbeispiele von Hauptkategorie 4 *Reduktion von Detailwissen durch Streichung* (KAT 1).

Unterkategorie	Ausgewähltes Ankerbeispiel
4.1 Zieldefinitionen	„Ziel des Hochofenprozesses ist die Gewinnung von elementarem Eisen aus Eisen(III)-oxid.“ (Kat. 4.1 Zielsetzung ohne konkreten Stoff-Teilchen-Bezug; Posttest; Proband 28; Simulations-Gruppe)
4.2 Schwerpunktsetzungen	„Und Wasser, auch hier wieder, und Wasser. Müsste dann eigentlich Wassermoleküle sein, um es auf Teilchenebene runterzubringen.“ (Kat 4.2.1 Schwerpunkt Teilchenebene; Prätest; Proband 56; HMD-AR-Gruppe)
4.3 Detailreduktion	„ Hg^{2+} würde ich auch eher weglassen tatsächlich.“ (Kat. 4.3.1 Reduktion auf Teilchenebene; Prätest; Proband 41; HMD-AR-Gruppe)
4.4 Text-Sym.-Zusammenfassungen	„[...] Wir haben eine Gesamtgleichung mit einer Oxidation von Quecksilber, einer Reduktion von Nitraten und der Redoxgleichung.“ (kein Stoff-Teilchen-Bezug; Prätest; Proband 12; AR-Gruppe)

Aufgrund fehlender Codierungen wurde die Subkategorie zur Detailreduktion des Stoff-Teilchen-Ebenenwechsels eliminiert. Die vier Unterkategorien umfassen demnach Zielstellungen, Schwerpunktsetzungen, Detailreduktionen und Inhaltzusammenfassungen, deren Ankerbeispiele in Tabelle 52 vorgestellt werden.

Hauptkategorie 5: Oberflächenelaboration

In Hauptkategorie 5 als Single-Kategorie wurden keine induktiven Anpassungen vorgenommen (vgl. Tabelle 48). Das Ankerbeispiel in Tabelle 53 demonstriert, dass sich die Testperson anhand formaler Merkmale, wie dem Auftreten gleicher bzw. unterschiedlicher Symbole, oberflächlich orientiert.

Tabelle 53. Ankerbeispiel von Hauptkategorie 5 *Oberflächenelaboration* (KAT 1).

Ausgewähltes Ankerbeispiel
„Und - kurz vergleichen, wo hier die Unterschiede sind.“ (Posttest; Proband 43; HMD-AR-Gruppe)

Hauptkategorie 6: Monitoring Statements

Hauptkategorie 6 wurde final mit vier Unterkategorien ausdifferenziert (vgl. Tabelle 48). Codiert werden inhaltsneutrale Äußerungen, die beispielsweise (Un-) Verständnis, Zustimmung, Unwissen, Interesse, Neugier, Neues oder den Umgang mit (M)ER ausdrücken (vgl. Ankerbeispiele in Tabelle 54).

Tabelle 54. Ankerbeispiele von Hauptkategorie 6 *Monitoring Statements* (KAT 1).

Unterkategorie	Ausgewähltes Ankerbeispiel
6.1 Verständnis Statements	„Okay. Die beziehen sich jetzt darauf, alles klar.“ (Prätest; Proband 43; HMD-AR-Gruppe)
6.2 Missverständnis Statements	„Sodass - Ich verstehe den Satz nicht.“ (Posttest; Proband 2; AR-Gruppe)
6.3 Neues und Interesse	„Stahl. Ach, da geht es um Stahl.“ (Posttest; Proband 14; AR-Gruppe)
6.4 Umgang mit Text und Symbol	„Jetzt muss ich mir das mal ganz kurz anschauen.“ (Posttest; Proband 2; AR-Gruppe)

Hauptkategorie 7: Restkategorie

Nachdem Hauptkategorie 7 um die Unterkategorie hinsichtlich wortgetreuer Wiederholungen von bereits Gesagtem gekürzt wurde, setzt sie sich aus zwei Unterkategorien zusammen (vgl. Tabelle 48). Die Ankerbeispiele in Tabelle 55 zeigen Probandenaussagen auf, die in keinem thematischen Zusammenhang mit den Aufgaben stehen oder keiner anderen Kategorie eindeutig zugeordnet werden konnten.

Tabelle 55. Ankerbeispiele von Hauptkategorie 7 *Restkategorie* (KAT 1).

Unterkategorie	Ausgewähltes Ankerbeispiel
7.1 Verbalisierungen, die nicht im them. Zusammenhang stehen	„Oh mein Gott Laut Denken ist schon eine Herausforderung.“ (Prätest; Proband 35; Simulations-Gruppe)
7.2 Verbalisierungen, die im them. Zusammenhang stehen, sich aber keiner Kat. Zuordnen lassen	„Also, solche komplexen Gleichungen kommen bei uns überhaupt nicht vor, in der Realschule. Darum muss ich gucken, inwiefern ich da die Schüleraussagen bewerten kann.“ (Prätest; Proband 15; AR-Gruppe)

12.1.2 Finales Kategoriensystem zum Umgang mit der chemischen Fachsprache mit exemplarischen Belegen

Insgesamt wurden über alle drei Vergleichsgruppen hinweg 6105 Probandenäußerungen in KAT 2 kategorisiert, die den 60 Transkripten aus Prä- und Posttest entnommen werden konnten. Davon waren 2121, 1930 bzw. 2054 Statements auf die AR-, Simulations- bzw. HMD-AR-Gruppe zurückzuführen. Erwartungsgemäß stützten sich die Codings an den in Kapitel 11.6.1 vorgestellten theoretischen Konstrukten, sodass Texte vor allem Fachbegriffe oder Verbindungs- bzw. Trivialnamen, Symbole diverse Formeltypen und ihre Reaktionsgleichungen und MER die Kombination aus beiden umfassten. 20 % des Datenmaterials zum Umgang mit (M)ER wurde doppelt codiert. Dabei wurde ein Cohen's κ von .89 ermittelt, der für eine sehr hohe und äußerst zufriedenstellende Inter-Kodierer-Reliabilität spricht. Das finale KAT 2 lässt sich, orientiert an der vorläufigen Version aus Kapitel 11.6.1, in drei übergeordnete Hauptkategorien aufschlüsseln, die eine differenzierte Codierung von Statements bezüglich des Umgangs mit der chemischen Fachsprache ermöglichen sollen. Dabei wurden marginale Änderungen der vorläufigen Version aus Kapitel 11.6.1 vorgenommen, sodass sich die drei Hauptkategorien in neun Unterkategorien mit insgesamt 36 Subkategorien gliedern lassen. Nachstehend werden die induktiven Anpassungen der Haupt- und Unterkategorien von KAT 2 mit ausgewählten Ankerbeispielen vorgestellt.

Tabelle 56. Übersicht der Haupt- und Unterkategorien von KAT 2 zum Umgang mit (M)ER mit ihren induktiven Kategorienentwicklungen und abschließenden Anzahlen an Subkategorien.

Haupt- bzw. Unterkategorie	Induktive Kategorienbildung des finalen KAT 2 zum Umgang mit (M)ER für Hauptstudie 2	Anzahl Subkategorien
1. Hinzufügen v. Wissenselementen	d. Abruf zugeh. Wissens aus Gedächtnis	$\sum = 7$
1.1 Nennung von Wissenselementen, die nicht in der gerade behand. Aufg. behandelt werden	Eliminierung von 1.1.2 <i>Aus einer vorherigen Aufgabe aus dem Symbol</i>	3
1.2 Suche nach Beziehungen	Eliminierung von 1.2.3 <i>mit der AR-Lernumgebung</i>	3
1.3 Nachschlagen/nochmals lesen	Zusammenfassung zu einer Single-Kategorie mit Bezug zum Text	1
2. Vergeblicher Abruf v. Informationen aus dem Gedächtnis (keine Sub-Kat.)		-
3. Hinzufügen von Wissen durch Wissenserzeugung mittels (logisch.) Inferenzen		$\sum = 23$
3.1 Inferenzen (Textbasis/ment. V.)		15
3.1.1 Paraphrasierungen	Eliminierung von 3.1.1.5 <i>Aus Symbol in Bild</i>	
3.1.2 Herstellen von Beziehungen	Keine Änderungen	
3.1.3 Lösungswege beschreiben	Keine Änderungen	
3.2 Inferenzen (Situationsmodell)	Eliminierung von 3.2.6.4 <i>Wahrnehmen von Widerspruch</i>	6
3.3 Weiterführende Inferenzen	Umstrukturierung von Kategorie 3.3 <i>Zusatz Inferenzen (Textbasis)</i> als Erweiterung von Kategorie 3.1	2
4. Reduktion von Detailwissen durch	Streichung	$\sum = 6$
4.1 Zieldefinitionen	Eliminierung der Single-Kategorie	-
4.2 Schwerpunktsetzungen		3
4.3 Detailreduktion	Keine Änderungen	2
4.4 Text-Symbolzusammenfassung	Keine Änderungen	1
5. Oberflächenelaboration		
6. Monitoring Statements		
7. Restkategorie		

Hauptkategorie 1: Hinzufügen von Wissenselementen durch Abruf zugehörigen Wissens aus dem Gedächtnis

Die Unterkategorien 1.1 bis 1.3 wurden kompakt zusammengefasst (vgl. Tabelle 56). Einerseits konnten keine Äußerungen hinsichtlich des Nennung von Wissenselementen aus vorherigen Aufgaben aus dem Symbol (Kategorie 1.1.2) ermittelt werden und andererseits schien die Subkategorie zur Suche nach Beziehungen mittels Lernumgebung redundant zu sein. Überdies wurden lediglich Texte nochmals gelesen oder nachgeschlagen, sodass 1.4 zu einer Single-Kategorie gebündelt wurde. Es werden in Tabelle 57 folgende Ankerbeispiele angeführt:

Tabelle 57. Ankerbeispiele von Hauptkategorie 1 *Hinzufügen von Wissensselementen durch Abruf zugehörigen Wissens aus dem Gedächtnis* (KAT 2).

Unterkategorie	Ausgewähltes Ankerbeispiel
1.1 Nennung von Wissensselementen, die nicht in der gerade behandelten Aufgabe behandelt werden	„Bei der Oxidation werden Elektronen abgegeben. Bei der Reduktion werden sie aufgenommen.“ (Kat. 1.1.4 Nennung von Vorwissen ohne eindeutigen ER-Bezug; Prätest; Proband 14; Simulations-Gruppe)
1.2 Suche nach Beziehungen	„Wo sehe ich jetzt ein Kation? Das wäre jetzt hier im Prinzip komplett auf der linken Seite. (Kat. 1.2.2 Suche nach Beziehungen mit dem Symbol; Posttest; Proband 29; Simulations-Gruppe)
1.3 Nachschlagen/nochmals Lesen	„Findet ausschließlich zwischen Cu^{2+} und Fe-Atomen statt durch eine Übertragung der Elektronen.“ (Text-Bezug; Posttest; Proband 20; AR-Gruppe)

Hauptkategorie 3: Hinzufügen von Wissen durch Wissensserzeugung mittels Inferenzen

In Kategorie 3 konnte die detaillierte Feingliederung der Unterkategorien des ursprünglich deduktiv entwickelten Kategoriensystems weitgehend übernommen werden. Analog zu KAT 1 wurden mit Kategorie 3.3 keine weiterführenden Inferenzen, die über die gegebenen Inhalte der Testaufgaben bzw. Lernumgebung hinausgehen, codiert (vgl. Kroß & Lind, 2001). Vielmehr offenbarten sich in den Probandenäußerungen (skeptische) Beurteilungen zu den ER, sodass diese Kategorie, analog zu KAT 1, inhaltlich umstrukturiert wurde und von nun an als Erweiterung von 3.1 zu betrachten ist. Paraphrasierungen aus Symbol in Bild (vgl. Tabelle 56) konnten nicht festgestellt werden, wodurch sich eine Eliminierung dieser Subkategorie anschloss. Ausgewählte Ankerbeispiele der drei Unterkategorien werden in Tabelle 58 vorgestellt.

Tabelle 58. Ankerbeispiele von Hauptkategorie 3 *Hinzufügen von Wissen durch Wissensserzeugung mittels (logischer) Inferenzen* (KAT 2).

Unterkategorie	Ausgewähltes Ankerbeispiel
3.1 Inferenzen (Textbasis)	„Also auf Stoffebene wird ein Salz mit Kohlenstoff umgesetzt.“ (Kat. 3.1.1.4 Paraphrasieren aus Symbol in Text; Posttest; Proband 21; Simulations-Gruppe)
3.2 Inferenzen (Situationsmodell)	„Also wenn Sauerstoff zugegeben wird, müsste mit dem Kohlenstoff aus Eisenerz, Koks und Zusatzstoffe, müsste doch dann eben zu $2CO_2$ reagieren und zu $2CO$ werden. (Kat. 3.2.1.3 Schlussfolgern mit Text und Symbol; Posttest; Proband 46; HMD-AR-Gruppe)
3.3 Zusatz Inferenzen (Textbasis)	„Da fehlen jetzt aus meiner Sicht die freien Elektronenpaare.“ (Kat. 3.3.1 Zweifel an gegeben (M)ER; Posttest; Proband 16; AR-Gruppe)

Anmerkung. Zur besseren Änderungsnachverfolgung wird Unterkategorie 3.3 als Zusatz von 3.1. gesondert aufgeführt.

Hauptkategorie 4: Reduktion von Detailwissen durch Streichung

Hauptkategorie 4 wurde um zwei Unterkategorien gekürzt (vgl. Tabelle 56), da Statements bezüglich wahrgenommener Widersprüche oder Zielsetzungen den Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) nicht eindeutig zugewiesen werden konnten. Nachdem die Äußerungen bereits in KAT 1 dahingehend identifiziert wurden, war ihre erneute Zuweisung mit KAT 2 nicht nötig. Die Ankerbeispiele in Tabelle 59 geben einen Einblick in die codierten Probandenaussagen.

Tabelle 59. Ankerbeispiele von Hauptkategorie 4 *Reduktion von Detailwissen durch Streichung* (KAT 2).

Unterkategorie	Ausgewähltes Ankerbeispiel
4.2 Schwerpunktsetzungen	„Muss ich mir jetzt mal unterstreichen. Also violette Farbe Rotkohl [...].“ (Kat. 4.1.1 Schwerpunktsetzung Text; Posttest; Proband 13; AR-Gruppe)
4.3 Detailreduktion	„Man würde also den Begriff Reduktion hier erst mal rauslassen.“ (Kat. 4.2.1 Reduktion Text; Prätest; Proband 19; AR-Gruppe)
4.4 Text-Sym.-Zusammenfassungen	„Also wir sehen hier die Reaktionsgleichungen. $NH_4OH + HCl$.“ (kein eindeutiger Bezug zu Text oder Symbol; Prätest; Proband 3; AR-Gruppe)

12.2 Gruppenvergleich zur Untersuchung der Wirksamkeit von AR auf das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis

Zur Klärung der Wirksamkeit von AR auf das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis (vgl. FF1₂ und FF2₂ in Kapitel 5.3) werden nachstehend bedeutsame Kategorien und ihre Befunde aus den Häufigkeits- und Inhaltsanalysen der Simulations- und AR-Gruppe (N = 40) von Messzeitpunkt 1 (Prätest) und Messzeitpunkt 2 (Posttest) detailliert vorgestellt. Eine vollständige Auflistung der Coding-Häufigkeiten und der zugehörigen prozentualen Anteile, sowie deren inhaltlichen Veränderungen von Prä- auf Posttest kann im Anhang mit Ankerbeispielen eingesehen werden. Die prozentualen Anteile wurden ermittelt, indem die relativen Häufigkeiten aus den absoluten Häufigkeiten der betreffenden Sub- oder Unterkategorie und ihrer nächst höheren Oberkategorie gebildet wurden.

12.2.1 Ausbildung unterschiedlicher Elaborationsprofile durch AR

Insgesamt wurden in den beiden Vergleichsgruppen 6843 Probandenäußerungen mit KAT 1 kategorisiert, die den 80 Transkripten aus Prä- und Posttest entnommen werden konnten. Davon waren 3468 bzw. 3375 Statements auf die AR- bzw. Simulations-Gruppe (AR, Sim) zurückzuführen, wobei durchschnittlich 54 % der Aussagen aus dem Prä- und ca. 46 % aus dem Posttest stammen. Die Unterschiede in den Coding-Anzahlen der Hauptkategorien zwischen Messzeitpunkt 1 auf 2 demonstrieren erste Tendenzen eines veränderten Elaborationsverhaltens nach dem Treatment. Zwar elaborierte die AR-Gruppe zu beiden Messzeitpunkten weniger „suchorientiert“ und mehr „verstehensorientiert“, nach Bearbeitung der AR-Lernumgebung

scheinen die Probanden aber stärker zum Aufbau einer Textbasis bzw. einer mentalen Vorstellung sowie eines Situationsmodells angeregt worden zu sein (Coding-Zunahme in Hauptkategorie 3; vgl. Tabelle A22 in Anhang A.3.3.1). Entsprechend wurden weniger Wissenskonstruktionen aus dem Gedächtnis und Beziehungssuchen angestellt (Coding-Abnahme in Hauptkategorie 1; vgl. Tabelle A22 in Anhang A.3.3.1). Die Simulations-Gruppe weist einen ähnlichen Trend auf, zeigt jedoch im Vergleich zur AR-Gruppe nach dem Treatment kaum Veränderungen in den Hauptkategorien 3 und 4 (vgl. Tabelle A23 in Anhang A.3.3.1). Das simulationsbasierte Setting scheint, aufgrund der Abnahme an Codings in Kategorie 1 und der Zunahme an Codings in Kategorie 2 (vgl. Tabelle A23 in Anhang A.3.3.1), tendenziell eher das „suchorientierte Lernen“ beeinflusst zu haben. Der Wissensabruf erfolgt daher von Prä- auf Posttest stärker vergeblich (vgl. Hauptkategorie 2). Um den Umgang mit Stoff- und Teilchenebene besser beurteilen zu können, werden die Probandenaussagen ausgewählter Subkategorien des Prä- und Posttests quantitativ sowie qualitativ analysiert und die Gruppen einander gegenübergestellt.

Hauptkategorie 1: Hinzufügen von Wissens-elementen durch Abruf zugehörigen Wissens aus dem Gedächtnis

Nennung von Wissen aus dem Gedächtnis. Der Vergleich beider Gruppen zeigt mit Blick auf die Veränderung von ersten auf zweiten Messzeitpunkt eine Abnahme an Codierungen in Kategorie 1.1 *Nennung von Wissens-elementen, die nicht in der gerade behandelten Aufgabe behandelt werden*, wobei beide Gruppen im Prätest mehr Inhalte aus dem Vorwissen als im Posttest nannten, und eine Zunahme an Statements in Kategorie 1.2 *Suche nach Beziehungen* (vgl. Tabelle A24 in Anhang A.3.3.1). Abbildung 39 demonstriert mit Blick auf die Verwendung von Stoff- und Teilchenebene das Elaborationsverhalten der Probanden zu Messzeitpunkt 1 und 2.

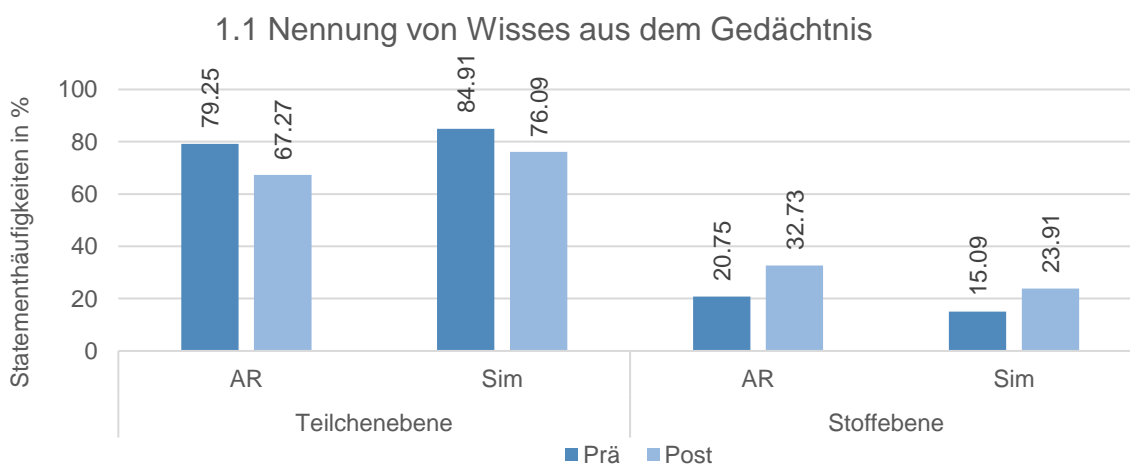


Abbildung 38. Übersicht der relativen Statementhäufigkeiten in Prozent aus KAT 1 der AR- und Simulations-Gruppe (AR und Sim) zu Messzeitpunkt 1 und 2 für die Subkategorien von 1.1 *Nennung von Wissen aus dem Gedächtnis* mit ihrer Grundgesamtheit an Statements aus Prä- und Posttest ($N_{Prä} = 215$, $N_{Post} = 111$).

Der Wissensabruf beider Vergleichsgruppen stützte sich zu Messzeitpunkt 1 und 2 stärker auf die Teilchenebene und weniger auf die Stoffebene (vgl. Abbildung 39). Wird die Entwicklung des Elaborationsverhaltens von ersten auf zweiten Messzeitpunkt begutachtet, so lässt sich bei der AR-Gruppe eine prozentuale Abnahme von 11.97 % bezüglich der Teilchenebene und eine entsprechende Zunahme mit Blick auf die Stoffebene feststellen. Obgleich in der Simulations-Gruppe ein ähnliches Verhaltensmuster gemessen wird, zeigt sich die Veränderung in den Kategorisierungen zur Teilchen- bzw. Stoffebene mit 8.82 % etwas weniger ausgeprägt. Zudem ergab die Inhaltsanalyse, dass die Qualität der Aussagen in Kategorie 1.1.3.1 *Inhalte auf Teilchenebene* anstieg, wobei keine Gruppenunterschiede diagnostiziert werden konnten. Im Prätest wurden von Simulations- und AR-Gruppe tendenziell eher Termini und kurze Definitionen genannt und im Posttest vermehrt Erklärungen und detailreiche Beschreibungen der Fachinhalte angestellt, die sich vor allem in Aufgabe 1 zum Farbstoff Cyanidin und in Aufgabe 3 zu den Hochofenprozessen auftraten. Zu Messzeitpunkt 1 wurde das Wissen häufig voreilig ohne näherer Beschreibungen abgerufen und wirkt damit unvollständig. Dabei achteten die Probanden nur wenig auf fachsprachliche Korrektheit zur Explikation von Stoff- und Teilchenebene, da beispielsweise Begrifflichkeiten wie „Atom“ oder „Gas“ zur Differenzierung der Ebenen vernachlässigt wurden (s. Tabelle 60). Im Posttest ließ sich ein höheres Inhaltsniveau der Probandenaussagen messen. Zwar werden auch dann noch Schwierigkeiten hinsichtlich des Wissensabrufs auf Teilchenebene aufgedeckt, jedoch scheinen beide Gruppen in der Grundgesamtheit, durch Einschluss vermehrter Fachbegriffe wie „Pi-Elektronensystem“ oder „konjugierte Doppelbindungen“, dezidierter Wissen auf Teilchenebene abzurufen (vgl. Tabelle 60).

Tabelle 60. Ausgewählte Ankerbeispiele von Proband 22 der Simulations-Gruppe und Proband 3 der AR-Gruppe des Prätests aus Subkategorie 1.1.3.1 *Inhalte auf Teilchenebene* zu Messzeitpunkt 1 und 2.

Ausgewählte Ankerbeispiele

Prätest

„So. wir können natürlich sehen, dass **Natrium** nicht die Oktett-Regel erfüllt.“

(Aufgabe 1; Proband 22 der Simulations-Gruppe)

Posttest

„Indicare heißt anzeigen. Das zeigt also an in welchem Medium sich der Farbstoff befindet. Die Struktur der Farbigkeit von organischen Stoffen kann man erkennen an den, an den **pi-Elektronensystem**, dem **konjugierten pi-Elektronensystem** [...]“

(Aufgabe 1; Proband 3 der AR-Gruppe)

Anmerkung. Wichtige Stellen wurden blau markiert (auch in den folgenden Ankerbeispielen).

Suche nach Beziehungen. Kategorie 1.2 zur Suche nach Beziehungen mit den gegebenen Testaufgabeninhalten bestätigt, dass im Allgemeinen bevorzugt auf Teilchenebene und weniger auf Stoffebene nach Beziehungen gesucht wurde.

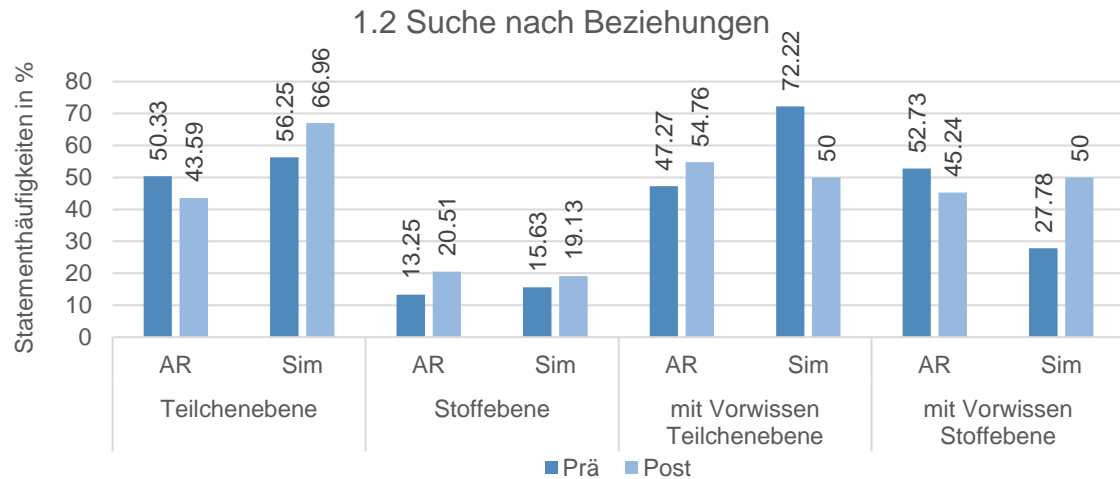


Abbildung 39. Übersicht der relativen Statementhäufigkeiten in Prozent aus KAT 1 der AR- und Simulations-Gruppe (AR und Sim) zu Messzeitpunkt 1 und 2 für die Subkategorien von 1.2 *Suche nach Beziehungen* mit ihrer Grundgesamtheit an Statements aus Prä- und Posttest ($N_{Prä} = 279$, $N_{Post} = 232$).

Wohingegen nach dem Treatment bei der AR-Gruppe die Beziehungssuche mit 6.74 % auf Teilchenebene ab- und mit 7.27 % auf Stoffebene zunahm, erhöhten sich die Coding-Anzahlen in der Simulations-Gruppe in beiden Subkategorien, und vor allem auf Teilchenebene mit 10.71 % (vgl. Abbildung 40). Ferner zeigt die Kategorie zur Suche nach Beziehungen mit dem Vorwissen ein heterogeneres Bild zwischen den Gruppen mit wesentlich stärkeren Elaborationsveränderungen in der Simulations-Gruppe auf (vgl. Abbildung 40). Auch hier bewegte sich die AR-Gruppe nach Bearbeitung der AR-Lernumgebung stärker auf Teilchen- und weniger auf Stoffebene. Die Simulations-Gruppe hingegen suchte von Prä- auf Posttest mit einer beachtlichen Zunahme von 22.22 % mehr nach Vorwissen auf Stoff- als auf Teilchenebene (vgl. Abbildung 40). Die qualitative Inhaltsanalyse der Subkategorie zur Suche nach Beziehungen auf Teilchenebene demonstriert, dass die Versuchspersonen beider Gruppen im Prätest oftmals unpräzise formulierten und folglich die Stoffebene inkorrekt in ihre Denkprozesse auf Teilchenebene integrierten. Auch hierbei wurde deutlich, dass eine unzureichende Fokussierung auf Fachbegriffe die explizite Ebenentrennung stört und damit das Denken in den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) negativ beeinflusst (vgl. Tabelle 61).

Tabelle 61. Prä-Post-Vergleich mit ausgewählten Ankerbeispielen von Proband 6 der AR-Gruppe aus Subkategorie 1.2.1 *Suche nach Beziehungen auf Teilchenebene*.

Ausgewählte Ankerbeispiele von Proband 6 der AR-Gruppe

Prätest

„Hier werden jetzt die *Teilgleichungen* miteinander in Verbindung gebracht, nicht einzeln betrachtet, an welcher Stelle das *Wasser entsteht* [...] dem *Ladungsausgleich* auf den *Teilchenausgleich* noch ergänzen, sodass deutlicher wird, aus welchen *Teilgleichungen* das *Wasser abgeschieden* wird.“

(Aufgabe 4)

Posttest

„Das passiert dann in der Reaktionszone Fe und die anderen *Atome*, [...] *Fe als Koeffizient*. Aber die anderen *Kohlenstoff- und Sauerstoffatome reagieren* natürlich auch noch mit [...] wahrscheinlich dann *Kohlenstoffdioxid* entstehen. *Drei Kohlenstoffmonoxid* hatten wir entsprechend schon [...] versucht.“

(Aufgabe 3)

Im Prätest wurden vor allem beim Aufstellen von Teilgleichungen rudimentär Verbindungsnamen genannt ohne den bewussten Bezug zur Teilchenebene herzustellen. Durch das Treatment ließ sich dieses Problem zwar nicht beheben, dennoch weist die qualitative Untersuchung des Datenmaterials darauf hin, dass vor allem in der AR-Gruppe, im Anschluss an die Bearbeitung der AR-Lernumgebung, tendenziell gezielter mit der Fachsprache umgegangen wurde, z.B. durch Nennung von Begrifflichkeiten wie „Moleküle“ oder „Atome“ (vgl. Tabelle 62). Die Simulations-Gruppe liefert ein ähnliches, jedoch weniger stark ausgeprägtes, Bild (vgl. Anhang). Auch die qualitative Inhaltsanalyse der Codierungen von Kategorie 1.2.2 *Suche nach Beziehungen auf Stoffebene* aus dem Prätest bestätigt in beiden Versuchsgruppen die in Kapitel 2.2 angeführten Schwierigkeiten hinsichtlich des Umgangs mit den Ebenen nach Johnstone (1993, 2000). Werden die Protokolle des Lauten Denkens des Posttests näher betrachtet, zeigt sich in beiden Gruppen ein tendenziell verbessertes Elaborationsverhalten bezüglich der Nutzung von Stoff- und Teilchenebene. Tabelle 62 demonstriert exemplarisch am Prä-Post-Vergleich der AR-Gruppe den Entwicklungsprozess bei der Suche nach Beziehungen auf Stoffebene.

Tabelle 62. Prä-Post-Vergleich mit ausgewählten Ankerbeispielen von Proband 11 der AR-Gruppe aus Subkategorie 1.2.2 *Suche nach Beziehungen auf Stoffebene*.

Ausgewählte Ankerbeispiele von Proband 11 der AR-Gruppe

Prätest	Posttest
<i>Moment, Verchromung nochmal, Verchromung heißt ja, dass ich das Chrom abscheiden lasse. Also sprich, ich habe vorher die Ionen und möchte dann, dass daraus dann ein Feststoff ist, also sprich, die Atome entstehen.“</i>	<i>„Schmelzzone. Hui. Ich stehe jetzt darüber oder darunter. Ja, an sich geht es ja nach oben. Also, man bläst jetzt hier den Sauerstoff durch. Da muss hier die Schmelzzone sein. (5 Sek.) Ja, Schmelzzone. Und da habe ich das. Okay, Vorwärmzone.“</i>
(Aufgabe 3)	(Aufgabe 3)

Entsprechend versuchte Proband 11 im Prätest die Informationen auf Stoffebene zum Verchromen zu sortieren, indem er sich auf die Abscheidung von Chrom an der Kathode konzentrierte. Jedoch wurden zusätzlich Begriffe der Teilchenebene eingebunden, die eine unpräzise Elaboration nach sich zogen (vgl. Tabelle 62). Mangelnde Sprachfertigkeiten unterstreichen die Ungenauigkeiten im Umgang mit Stoff- und Teilchenebene, da die (M)ER immer wieder uneinheitlich genutzt wurden. Nach dem Treatment beschäftigte sich die Versuchsperson strukturierter mit den Aufgabeninhalten auf Stoffebene, ohne dabei die Teilchenebene einzubinden, und hinterfragte diese weniger oberflächlich. Das Beispiel von Proband 11 untermauert den dezidierten Umgang der AR-Gruppe, wenn es um die Verwendung der Stoffebene im Posttest geht. Die Ergebnisse der qualitativen Untersuchung zur Beziehungssuche mit dem Vorwissen aus den Subkategorien 1.2.3.1 *auf Stoffebene* und 1.2.3.2 *auf Teilchen-*

ebene stehen im Einklang mit den beschriebenen Befunden. Infolgedessen wurde die Teilchenebene im Prätest nicht durchgängig explizit von der Stoffebene (und umgekehrt) getrennt. Inkohärente Repräsentationswechsel und die fehlerbehaftete Anwendung von chemischen Notationen wie Wertigkeiten, Koeffizienten usw. zu Messzeitpunkt 1 unterstreichen dieses Resultat. Im Posttest konnte eine tendenziell intensivere Auseinandersetzung mit der Stoffebene, d.h. den Farben der Stoffe oder der Materialwahl usw., registriert werden. Obwohl die Unterschiede zwischen den Vergleichsgruppen in Hinblick auf den Wissensabruf marginal sind (vgl. Anhang), deuten die Ergebnisse darauf hin, dass die Probanden, nach Bearbeitung der AR-Lernumgebung, sicherer mit der Nutzung der Teilchenebene wurden. Dabei reduzierte sich in der AR-Gruppe durch das Treatment nicht nur die Anzahl der für diese Kategorie üblichen Fragen an sich selbst, sondern auch deren Inhalte. Die Fragen des Prätests repräsentieren des Öfteren Unsicherheiten mit der Teilchenebene. Im Posttest wurde jedoch verstärkt ein fachinhaltlicher Bezug hergestellt. Die Ankerbeispiele in Tabelle 63 zeigen auf, dass die Versuchspersonen in der Grundgesamtheit sprachlich auf einem Level bleiben, im Prätest aber eher die repräsentative Ebene auf Teilchenebene und im Posttest die fachwissenschaftlichen Inhalte (hier: Wertigkeiten) fokussieren.

Tabelle 63. Prä-Post-Vergleich in der Grundgesamtheit mit ausgewählten Ankerbeispielen von Proband 15 und Proband 3 der AR-Gruppe aus Subkategorie 1.2.3.2 *Suche nach Beziehungen mit dem Vorwissen auf Teilchenebene*.

Ausgewählte Ankerbeispiele

Prätest

„Also: NH_4^+ OH, mit aq. vielleicht sogar? Nein, ohne. plus H_3O^+ Cl dann plus dazwischen, weil das ist ja kein Salz. Sondern, wir haben ja vorher gelernt, dass das in Wasser sich so bildet.“

(Aufgabe 2; Proband 15 der AR-Gruppe)

Posttest

„Vermutlich wird es eher zu dreiwertigem Eisen, wenn, ja, es, könnte auch genauso gut zu zweiwertigem Eisen werden. Es ist aber eher wahrscheinlich, dass es dreiwertiges [...] dass es zweiwertiges Eisen [...].“

(Aufgabe 3; Proband 3 der AR-Gruppe)

Hauptkategorie 2: Vergeblicher Abruf von Vorwissen/Information aus dem Gedächtnis

Ähnlich wie die Häufigkeitsanalyse zeigt die qualitative Untersuchung der Statements aus Hauptkategorie 2 keine Gruppenunterschiede (vgl. Tabelle A22 in Anhang A.3.3.1). Es wird lediglich ersichtlich, dass im Prätest voreiliger Aussagen wie „Ich weiß nicht“ ohne tiefere Gedankengänge geäußert wurden, wohingegen im Posttest der Eindruck entstand, dass die Probanden in der Grundgesamtheit stärker und länger vergeblich nach Wissensinhalten aus ihrem Langzeitgedächtnis suchten (vgl. Tabelle 64). Vor allem die Aufgaben zum Hochofen und zur Galvanisierung (Ankeraufgabe 3 des Prätests und Ankeraufgabe 4 des Posttests, vgl. Kapitel 11.4.1) scheinen für die Versuchspersonen sehr komplex gewesen zu sein.

Tabelle 64. Prä-Post-Vergleich in der Grundgesamtheit mit ausgewählten Ankerbeispielen von Proband 11 der AR-Gruppe und Proband 40 der Simulations-Gruppe aus Kategorie 2 *Vergeblicher Abruf von Vorwissen/Information aus dem Gedächtnis*.

Ausgewählte Ankerbeispiele	
<p>Prätest</p> <p>„Nein. (7 Sek.) Ich brauche ja, wenn ich Chrom da habe - das geht ja auch nicht. Okay, ich gebe - ich muss aufgeben. Ich weiß Galvanisierung nicht mehr. Das muss ich mir dann einbläuen, keine Ahnung, ich bin da spontan ja total draußen.“</p> <p>(Aufgabe 3; Proband 11 der AR-Gruppe)</p>	<p>Posttest</p> <p>„[...] bin mir gerade nicht sicher, ob ich das hinbekomme, einen richtigen Versuchsaufbau, der auch eindeutig funktioniert, zu gestalten. Muss kurz nachdenken. (8 Sek.) Ah, das geht um die Verchromung (24 Sek.) Ich habe aktuell nicht die richtige Idee, muss passen.“</p> <p>(Aufgabe 4; Proband 40 der Simulations-Gruppe)</p>

Hauptkategorie 3: Hinzufügen von Wissen durch Wissenserzeugung mittels Inferenzen

Paraphrasieren und Herstellen von Beziehungen. Insgesamt sind die Gruppenunterschiede hinsichtlich der Codierungen in Unterkategorie 3.1 *Bildung von Inferenzen, die dem Aufbau einer Textbasis oder visuellen Vorstellung dienen* von Prä- auf Posttest, mit einer Zunahme von 0.68 % in der AR-Gruppe und einer Abnahme von 1.49 % in der Simulations-Gruppe, klein (vgl. Tabelle A29 in Anhang A.3.3.1). Die Subkategorien offenbaren aber, dass das Paraphrasieren und Beschreiben von Lösungswegen in beiden Gruppen nach dem Treatment abnehmen. Mit marginalen Differenzen, im Vergleich zur Simulations-Gruppe, zweifelt die AR-Gruppe nach der Nutzung der AR-Lernumgebung etwas mehr und stellt weniger inhaltliche Bewertungen an.

3.1.1 Paraphrasieren und 3.1.2 Herstellen von Beziehungen

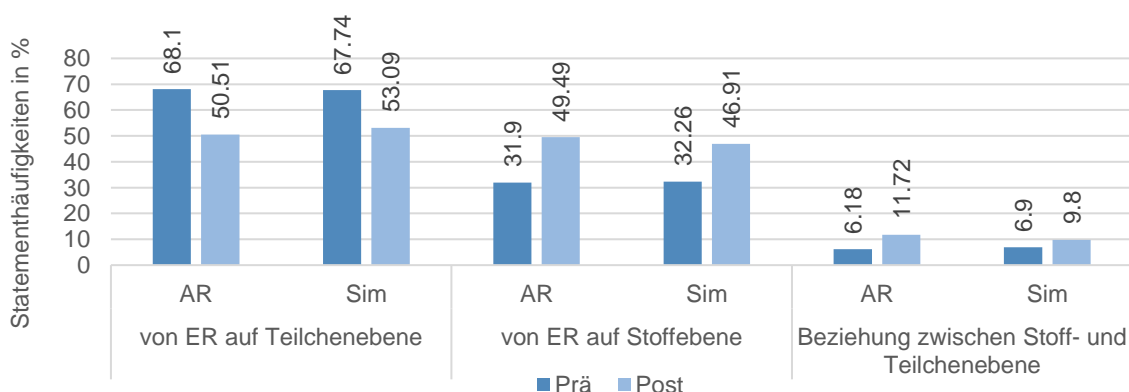


Abbildung 40. Übersicht der relativen Statementhäufigkeiten in Prozent aus KAT 1 der AR- und Simulations-Gruppe (AR und Sim) zu Messzeitpunkt 1 und 2 für die Subkategorien von 3.1.1 *Paraphrasieren* und 3.1.2 *Herstellen von Beziehungen* mit ihren Grundgesamtheiten an Statements aus Prä- und Posttest (3.1.1: $N_{Prä} = 240$, $N_{Post} = 180$ und 3.1.2: $N_{Prä} = 122$, $N_{Post} = 175$).

Abbildung 41 verdeutlicht, dass sich der Umgang mit Stoff- und Teilchenebene hinsichtlich des Paraphrasierens von Prä- auf Posttest in beiden Gruppen ausbalancierte und sich die einstige Fokussierung auf die Teilchenebene in Richtung Stoffebene verlagerte. Entsprechend wurden bei der Simulations- bzw. AR-Gruppe im Posttest, mit einer Zunahme von 14.66 % bzw. 17.60 %, mehr Paraphrasierungen auf Stoffebene getätigt. Überdies stellten beide Gruppen nach dem Treatment mehr Beziehungen zwischen den Ebenen her (vgl. Abbildung 41). Aus inhaltlicher Perspektive zeigt sich bei den Paraphrasierungen auf Teilchen- und Stoffebene ein heterogenes Bild. Obgleich in einigen Aussagen positive Ergebnisse im Umgang mit den Ebenen diagnostiziert wurden, demonstrieren die Statements häufig, in Übereinstimmung zu den vorherigen Kategorien, dass vor allem zu Messzeitpunkt 1 in beiden Vergleichsgruppen Stoff- und Teilchenebene unzureichend voneinander getrennt wurden.

Tabelle 65. Prä-Post-Vergleich mit ausgewählten Ankerbeispielen von Proband 3 der AR- und Proband 22 der Simulations-Gruppe aus Subkategorie 3.1.1.1 *Paraphrasieren auf Teilchenebene*.

Ausgewählte Ankerbeispiele von Proband 3 (AR) und Proband 22 (Sim)	
	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <p>Prätest</p> <p>AR „Also <i>aquatisierte Ionen</i>, [...] nicht nur im Wasser, sondern <i>mit Wasser umhüllt</i>.“</p> <p>(Aufgabe 5)</p> </div> <div style="width: 45%;"> <p>Posttest</p> <p>„[...] eine negative Ladung ausgehend vom Sauerstoff-Atom ganz links.“</p> <p>(Aufgabe 1)</p> </div> </div>
	<hr/> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <p>Sim „Entsteht <i>Ammoniumchlorid und H₂O</i>.“</p> <p>(Aufgabe 2)</p> </div> <div style="width: 45%;"> <p>„Das heißt, wir haben hier <i>Cyanidin in Form von einer [...] protonierten Hydroxylgruppe</i>.“</p> <p>(Aufgabe 1)</p> </div> </div>

Die Aussage aus Kategorie 3.1.1.1 *Paraphrasieren auf Teilchenebene* von Proband 3 (vgl. Tabelle 65) veranschaulicht, dass im Prätest versucht wurde, die Hydratisierung auf Teilchenebene zu erklären, jedoch Wasser ohne den Begriff „Moleküle“ auf Stoffebene in die Erläuterung integriert und eine Vermischung der Ebenen provoziert wurde. Dabei wurde die Ebenentrennung von uneinheitlichen Formulierungen, wie der gleichzeitigen Verknüpfung von Summenformeln und Verbindungsnamen, gestört (s. Tabelle 65). Die Qualitative Inhaltsanalyse der Statements deckte im Posttest eine intensivere Auseinandersetzung mit den jeweiligen Ebenen auf. Es wurde in beiden Gruppen zum einen tendenziell stärker auf die Begrifflichkeiten wie „Atom“, „Ion“, „Molekül“ usw. geachtet und zum anderen die Beschreibung der Teilchen- bzw. Stoffebene mehr gewichtet. Es wird betont, dass vor allem in Aufgabe 1 zum Farbstoff Cyanidin gewissenhafter auf Teilchenebene paraphrasiert wurde (vgl. Tabelle 65). Diese positiven Entwicklungen werden auch durch die Paraphrasierungen auf Stoffebene bestätigt. Gruppenunterschiede konnten dabei aber nicht aufgedeckt werden. Auch die qualitative Inhaltsanalyse der Codierungen aus Kategorie 3.1.2 *Herstellen von Beziehungen zwischen Teilchen- und Stoffebene* beweist, dass die Probanden beider Vergleichsgruppen Schwierigkeiten im Umgang mit den Ebenen hatten, die vor allem auf sprachliche Defizite zurückzuführen sind.

Exemplarisch wird in Tabelle 66 aufgezeigt, dass Proband 12 der AR-Gruppe Verbindungs- bzw. Trivialnamen mit Symbolschreibweisen arbiträr verknüpfte. Dabei wurde der Versuch gestartet die wässrige Lösung auf Stoffebene mit den „HNO₃“-Teilchen und den Teilchen „Nitrat-Anionen“ in Verbindung zu setzen, jedoch wurden die Ebenen unzureichend differenziert.

Tabelle 66. Ausgewähltes Ankerbeispiel des Prätests von Proband 12 der AR-Gruppe aus Subkategorie 3.1.2 *Herstellen von Beziehungen zwischen Stoff- und Teilchenebene.*

Ausgewähltes Ankerbeispiel

Prätest

„[...] *Salpetersäure ist ja HNO₃ in Wasser gelöst und hier haben wir ja nur die Nitratanionen.*“

(Aufgabe 5; Proband 12 der AR-Gruppe)

Die Statements von Kategorie 3.1.2 sollten aus fachdidaktischer Perspektive einen Stoff-Teilchen-Ebenenwechsel innehaben. Zahlreiche Aussagen demonstrieren, dass dieser, falls er erfolgte, sehr gut umgesetzt wurde (vgl. Tabelle 67). Dabei nannte Versuchsperson 4 konkret die Ebenen sowie deren Funktion und stützte ihre Aussagen auf zusätzlichen schriftlichen Notationen zur Teilchenebene, welche beispielsweise die Dissoziation mittels Ammonium-Ion als NH₄⁺ oder Hydroxid-Ion als OH⁻ usw. aufzeigen.

Tabelle 67. Ausgewähltes Ankerbeispiel des Prätests von Proband 4 der AR-Gruppe aus Subkategorie 3.1.2 *Herstellen von Beziehungen zwischen Stoff- und Teilchenebene.*

Ausgewähltes Ankerbeispiel

Prätest

„Sowohl auf der *Stoffebene*, dass ich dann ein *neutrales Produkt* bekomme, *Wasser* und eben *Salz*, das darin gelöst ist. Und dass ich das eben dann auch auf der *Teilchenebene* erklären kann, dass die *Ionen* miteinander eben *reagieren* zu Wasser und diesem Ammoniumchlorid.“

(Aufgabe 2; Proband 4 der AR-Gruppe)

Nach dem Treatment haben beide Gruppen verstärkt Bezug zur Lernumgebung genommen. Dabei wurden in der Grundgesamtheit der AR-Gruppe zu Messzeitpunkt 2 weniger fachsprachliche Fehlschläge festgestellt, die eine bessere Stoff-Teilchen-Ebenentrennung nach sich zogen (vgl. Tabelle 68).

Tabelle 68. Ausgewähltes Ankerbeispiel des Posttests von Proband 4 der AR-Gruppe aus Subkategorie 3.1.2 *Herstellen von Beziehungen zwischen Stoff- und Teilchenebene.*

Ausgewähltes Ankerbeispiel

Posttest

„sondern nur das elementare *Kupfer auf Stoffebene* ist eben *rot* und ein einzelnes *Atom hat keine Färbung.*“

(Aufgabe 5; Proband 4 der AR-Gruppe)

Lösungswege beschreiben. Werden die aufgeschlüsselten Subkategorien zur Lösungswegebeschreibung begutachtet (vgl. Abbildung 42), so lässt sich ableiten, dass hierfür beide Gruppen zum zweiten Messzeitpunkt häufiger Stoff- und Teilchenebene wählten. Demnach wurde ein Rückgang der Codierungen hinsichtlich der Teilchenebene mit 10.29 % bei der AR-Gruppe und mit 6.26 % bei der Simulations-Gruppe ersichtlich. Beide Gruppen wendeten die Stoffebene bzw. die Kombination beider Ebenen häufiger an.

3.1.3 Lösungswege beschreiben

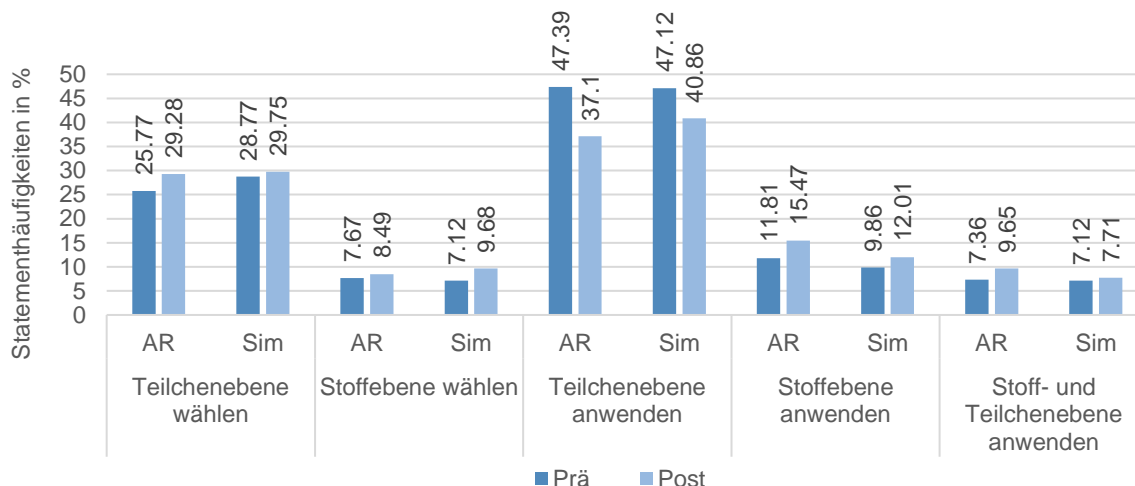


Abbildung 41. Übersicht der relativen Statementhäufigkeiten in Prozent aus KAT 1 der AR- und Simulations-Gruppe (AR und Sim) zu Messzeitpunkt 1 und 2 für die Subkategorien von 3.1.3 *Lösungswege beschreiben* mit ihrer Grundgesamtheit an Statements aus Prä- und Posttest ($N_{Prä} = 1382$, $N_{Post} = 1159$).

Werden die Codierungen der Subkategorie 3.1.3.1 *Teilchenebene wählen* qualitativ untersucht, wird deutlich, dass die Wahl der Teilchenebene überwiegend mit der Oxidationsbestimmung, dem Aufstellen von Ionen- oder den Teilgleichungen der Redoxreaktionen einherging. Der qualitative Gruppenvergleich der Aussagen des Prätests zeigt, dass die Simulations-Gruppe bereits vor der App-Bearbeitung etwas besser mit dem „Teilchen“-Begriff umging. Tabelle 69 gibt einen Einblick in die teils diffusen Ebenenwechsel der AR-Gruppe am Beispiel von Proband 3.

Tabelle 69. Prä-Post-Vergleich mit ausgewählten Ankerbeispielen von Proband 3 der AR- und Proband 22 der Simulations-Gruppe aus Subkategorie 3.1.3.1 *Teilchenebene wählen*.

Ausgewählte Ankerbeispiele von Proband 3 der AR-Gruppe

Prätest

„Deswegen würde ich die Reaktionsgleichung direkt mal ergänzen. Und das kleine **s** in Klammern. Es entsteht **Blei**, welches auch **fest** ist und **Kohlenstoffdioxid**, welches **gasförmig** ist. Dementsprechend auf **Teilchenebene**.“

(Aufgabe 3)

Posttest

„Die **konjugierte Doppelbindung** heißt, dass sich **Doppelbindungen** mit **Einfachbindungen** regelmäßig abwechseln. Wir haben hier ein **Doppelbindungssystem** mit **sieben Doppelbindungen**, die sich in **eines** durchzählen lassen. **Genau. Ja.**“

(Aufgabe 2)

Proband 3 befand sich beim Aufstellen der Reaktionsgleichung prinzipiell auf der Teilchenebene, betonte dies sogar, integrierte aber zeitgleich stoffliche Eigenschaften in seine Beschreibung ohne diese als Aspekte der makroskopischen Ebene zu betiteln. Das Datenmaterial demonstriert zwar keine exorbitante Veränderung zwischen den Messzeitpunkten der beiden Gruppen. Dennoch deuten die Aussagen vermehrt darauf hin, dass die AR-Gruppe nach dem Treatment aufgrund der gewählten (M)ER auf Teilchenebene (vgl. Aussage „konjugierte Doppelbindung“ in Tabelle 69) bewusster mit ihr umging und diese weniger mit der Stoffebene „vermischte“.

Subkategorie 3.1.3.2 *Stoffebene wählen* verdeutlicht, dass die Testinhalte auf Stoffebene gewählt wurden, um gezielt Ebenenwechsel in Richtung Teilchenebene zu implizieren. Auch wenn diese teilweise missglückten, können ihre Kategorisierungen als Wegbereiter für erfolgsversprechende Stoff-Teilchen-Ebenenwechsel angesehen werden. Dies wird sowohl im Prä- als auch in Posttest und vor allem bei den MC-Aufgaben deutlich. Beide Gruppen demonstrieren ähnliche Resultate von Messzeitpunkt 1 auf 2 und grenzen sich hinsichtlich der Aussagenqualität nicht voneinander ab. Auffallend ist lediglich, dass beide Gruppen im Posttest stärker auf die Definition der Stoffebene, und in diesem Kontext auf die Bedeutung der Sinnesorgane, eingegangen sind (vgl. Anhang). Darüber hinaus scheinen die Probanden im Posttest bewusster mit der Stoffebene zu arbeiten, da die Aufgabeninhalte, wie Reaktionsgleichungen, spezifischer analysiert und ausdrücklich konkrete Begriffe wie „Stoff“ eingebunden wurden (vgl. Tabelle 70).

Tabelle 70. Ausgewähltes Ankerbeispiel des Posttests von Proband 14 der AR-Gruppe aus Subkategorie 3.1.3.2 *Lösungswege beschreiben: Stoffebene wählen*.

Ausgewähltes Ankerbeispiel

Posttest

„[...] Das sind einfach die **Stoffe**, die dann miteinander reagieren. Und also **zwei Stoffe**, die dann einen anderen **Stoff** ergeben. [...]“

(Aufgabe 5; Proband 14 der AR-Gruppe)

Subkategorie 3.1.3.3 wird aufgrund des hohen Informationsgehalts als sehr bedeutsame Kategorie zur Erfassung des Stoff-Teilchen-Konzeptverständnisses angesehen, da mit ihr die Anwendung der Teilchenebene, beispielsweise durch Aufstellen von Reaktionsgleichungen, näher untersucht werden kann. Die Probandenaussagen von AR- und Simulations-Gruppe können zum ersten Messzeitpunkt qualitativ identisch eingestuft werden. Dabei wurde festgestellt, dass chemische Notationen wie Indizes oder Koeffizienten im Prätest des Öfteren vernachlässigt wurden und eben jene sprachlichen Ungenauigkeiten zu einer mehrdeutigen Verwendung der Ebenen führte.

Tabelle 71. Ausgewähltes Ankerbeispiel des Prätests von Proband 21 der Simulations-Gruppe aus Subkategorie 3.1.3.3 *Lösungswege beschreiben: Teilchenebene anwenden.*

Ausgewähltes Ankerbeispiel

Prätest

„Muss aber einen *Massenausgleich* machen, weil, ich habe ja die *Oxidation von elementarem Kohlenstoff* zum *CO₂-Molekül*. Und (da es ein) *Molekül* ist, schaue ich mir dann ja nicht nur die *Ionen* an oder die für mich relevanten *Teilchen*.“

(Aufgabe 4; Proband 21 der Simulations-Gruppe)

Das Ankerbeispiel von Proband 21 in Tabelle 71 demonstriert, dass die Verbalisierungen teilweise nicht eindeutig aufzeigen, auf welcher Ebene sich die Versuchsperson bei der Elaboration tatsächlich befand. Obgleich sich die Lehrkraft aufgrund des Aufstellens einer Reaktionsgleichung mittels Symbolen auf Teilchenebene bewegen vermochte, was wiederum durch die Begriffe „Molekül“, „Teilchen“ oder „Ionen“ pointiert wurde, ist unklar, ob sich der Massenausgleich oder die Betrachtung des „elementaren Kohlenstoffs“ nicht doch auch auf die Stoffebene bezog. Per se wäre nämlich der Rückgriff auf das Kohlenstoffatom als Teilchen wünschenswert gewesen, um einheitlich die Elaboration einzig auf Teilchenebene zu betonen (vgl. Tabelle 71). Die undurchsichtigen Aussagen in dem Statement erschweren die konkrete Ebenenzuordnung und lassen offen, ob und inwiefern ein Ebenenwechsel intendiert wurde.

Tabelle 72. Ausgewähltes Ankerbeispiel des Posttests von Proband 21 der AR-Gruppe aus Subkategorie 3.1.3.3 *Lösungswege beschreiben: Teilchenebene anwenden.*

Ausgewähltes Ankerbeispiel

Posttest

„Ich glaube, das war auf alle Fälle kam da Eisen und müsste da nämlich *CO₂* sein. Also Plus *CO₂*, wenn ich das jetzt ausgleiche, sind *zwei Eisenatome* und *drei CO₂-Moleküle* [...].“

(Aufgabe 3; Proband 2 der AR-Gruppe)

Diese Schwierigkeiten sind zwar in beiden Gruppen auch noch im Posttest persistent, jedoch kommunizierten die Probanden in der Grundgesamtheit und vor allem die AR-Gruppe auf einem sprachlich leicht angehobenen Niveau, da Koeffizienten und Fachbegriffe bedachter in die Erläuterungen eingeschlossen wurden (vgl. Tabelle 72). Auch die Kategorisierungen von 3.1.3.4 zur Stoffebene stehen im Einklang mit diesem Befund (vgl. Tabelle 73).

Tabelle 73. Prä-Post-Vergleich mit ausgewählten Ankerbeispielen von Proband 4 der AR-Gruppe aus Subkategorie 3.1.3.4 *Lösungswege beschreiben: Stoffebene.*

Ausgewählte Ankerbeispiele von Proband 4 der AR-Gruppe	
Prätest	Posttest
<p>„Aber zum Vergleichen kommen wir eben dann auf der Stoffebene, eine schöne Salzsynthese durchführen, wo man auch normalerweise dann sieht, dass es eine Wärmeentwicklung gibt. Dass vielleicht sogar eine Feuererscheinung, dass die beiden Elemente heftig miteinander reagieren, eben zum Salz. (Das wäre) die Erklärung auf Stoffebene [...].“</p>	<p>„[...] Versuch durchführen, um die Stoffebene sichtbar (zu machen). Man kann das Bleioxid erstmal zeigen als Salz. Man kann Holzkohle, also fast reinen Kohlenstoff [...] nach Durchführung der Reaktion sieht man, dass ein Gas entsteht, Kohlenstoffdioxid, und elementares Blei, das eben auch in seiner Farbe und Form sichtbar gemacht werden kann.“</p>
(Aufgabe 4)	(Aufgabe 2)

Die Qualität der Aussagen erhöhte sich von Prä- auf Posttest dahingehend, dass die Verwendung der Stoffebene etwas mehr erklärt und intensiver auf die Explikation der Stoffebene mit ihren beobachtbaren Charakteristika eingegangen wurde (vgl. Tabelle 73). Daher wurden einheitlichere Verbalisierungen durch die punktuelle Fokussierung auf Farben und Aggregatzustände diagnostiziert und Versuchsbeschreibungen, teils mit umfassenden Skizzen, ausführlicher beschrieben. Entsprechend stellte Proband 4 von Prä- auf Posttest konkretere Bezüge zur Stoffebene her, indem er beispielsweise durchweg die Elementnamen wie „Kohlenstoff“ mit Begriffen des Alltags wie „Holzkohle“ in Verbindung setzte. Unterschiede zwischen den Gruppen wurden dabei nicht aufgedeckt, ebenso wenig in Subkategorie 3.1.3.5 *Stoff- und Teilchenebene anwenden*, deren Codings häufig auf mündlichen Beschreibungen der Teilchenebene mit Symbolen und der parallelen Verschriftlichung von Aspekten der Stoffebene wie Aggregatzuständen (oder umgekehrt) fußten. Dabei ist erwähnenswert, dass die Schlussfolgerungen, basierend auf der simultanen Verwendung beider Ebenen, vermehrt fehlerbehaftet waren. Zwar wird dadurch das Wohlwollen der Probanden auf beide Ebenen einzugehen demonstriert, jedoch gelang der korrekte Ebenenwechsel selten.

Tabelle 74. Ausgewähltes Ankerbeispiel des Prätests von Proband 11 der AR-Gruppe aus Subkategorie 3.1.3.5 *Lösungswege beschreiben: Stoff- und Teilchenebene anwenden.*

Ausgewähltes Ankerbeispiel
<p>Prätest „Also zwei Gefäße und die zwei Elektroden und halt der Schlüssel müssen da in unterschiedliche Lösungen rein [...] Ionenbrücke [...] damit der Stromkreis geschlossen ist. So, wenn ich jetzt da rechts den Eisenschlüssel habe, dann muss ich das eintauchen lassen in Chromsulfatlösung, SO_4^{2-}, genau. So, Elektronen müssen zugeschleust werden, sodass dann das hier sich abscheidet, das Chrom. Genau, also plus drei e^-, dann habe ich das da.“</p>
(Aufgabe 4; Proband 11 der AR-Gruppe)

Tabelle 74 zeigt prototypisch die unglücklich gewählte Kombination der Ebenen. Es ist aufgrund der repräsentativen Wechsel undurchsichtig, wann sich Versuchsperson 11 nur auf

Stoff- oder Teilchenebene bewegte. Dabei wurden die Prozesse auf Teilchenebene wie Elektronenübergänge simultan mit dem Versuchsaufbau in Verbindung gesetzt ohne die Ebenen verbal oder durch Einbindung einer Super-Lupe explizit voneinander abzugrenzen. Ferner deuten die Ergebnisse darauf hin, dass es in den verbalen Aussagen vor allem bei Anfertigungen von Skizzen zum Versuchsaufbau zur inadäquaten Verknüpfung von Stoff- und Teilchenebene kam.

Inhaltliche Bewertungen. Auch die Subkategorien zur inhaltlichen Bewertung konstatieren von Messzeitpunkt 1 auf 2 in beiden Vergleichsgruppen eine deutliche Verschiebung von der Teilchen- in Richtung Stoffebene. Demnach lässt die Zunahme an Codings hinsichtlich der Bewertungen von Inhalten auf Stoffebene mit 17.50 % in der AR-Gruppe und 7.90 % in der Simulations-Gruppe darauf schließen, dass das AR-Setting zu einer tiefergehenden Auseinandersetzung mit der makroskopischen Ebene führte. Die inhaltlichen Bewertungen der Teilchenebene der Vergleichsgruppen unterscheiden sich qualitativ dahingehend, dass die AR-Gruppe nach dem Treatment stärker auf die chemische Fachsprache einging und die Simulations-Gruppe eher inhaltsbezogen evaluierte. Die nähere Betrachtung von Subkategorie 3.3.4.3 zum Ebenenwechsel liefert in der AR-Gruppe eine erste Tendenz einer positiven Entwicklung des Elaborationsverhaltens von Messzeitpunkt 1 auf 2, da der Ebenenwechsel und die bewusste Betitelung der Ebenen selbst stärker anvisiert wurde.

Schlussfolgerungen. Die Häufigkeitsanalysen der Subkategorien bezüglich der Inferenzen, die dem Aufbau eines Situationsmodells dienen, zeigen auf, dass nach Bearbeitung der Lernumgebungen in beiden Gruppen mehr Schlussfolgerungen angestellt wurden (Tabelle A30 in Anhang A.3.3.1).

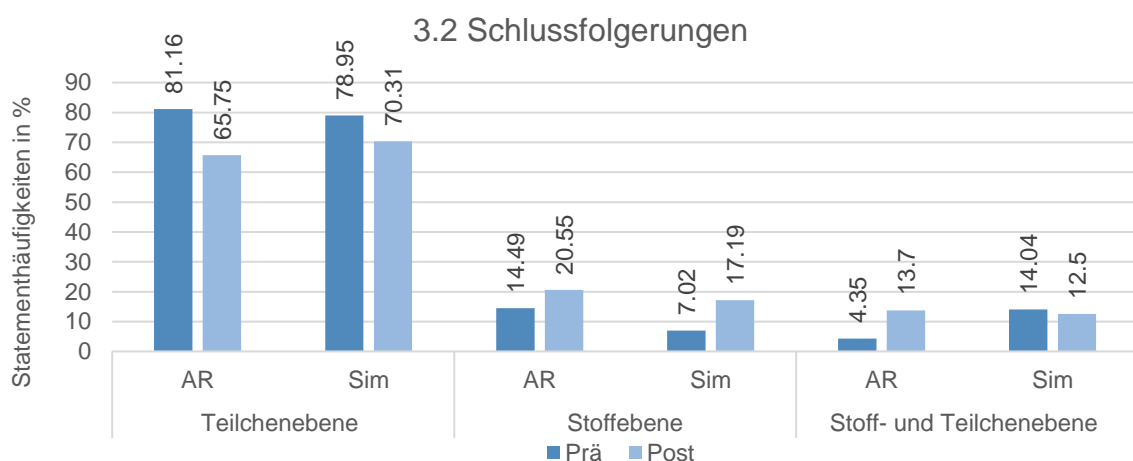


Abbildung 42. Übersicht der relativen Statementhäufigkeiten in Prozent aus KAT 1 der AR- und Simulations-Gruppe (AR und Sim) zu Messzeitpunkt 1 und 2 für die Subkategorien von 3.2 *Schlussfolgerungen* mit ihrer Grundgesamtheit an Statements aus Prä- und Posttest ($N_{\text{Prä}} = 504$, $N_{\text{Post}} = 490$).

Deutlich demonstriert die Aufschlüsselung der Unterkategorie 3.2, dass die Probanden nach der Bearbeitung der jeweiligen Lernumgebung etwas weniger auf Teilchenebene und intensiver mit der Stoffebene schlussfolgerten (vgl. Abbildung 43). Dies ging mit einer erhöhten Anzahl an Statements auf Stoffebene in der AR- und Simulations-Gruppe einher. Die etwas niedrigere Nutzung der Stoffebene bei der AR-Gruppe wurde durch die Schlussfolgerung auf Stoff- und Teilchenebene kompensiert, da ein Anstieg der Statements von 9,35 % festgestellt wurde. Dabei zielten die Statements der AR-Gruppe im Posttest häufig auf beide Ebenen ab und lassen damit die Schwerpunktsetzung auf die Stoffebene erkennen. Im Vergleich dazu zeigen sich die Veränderungen der Simulations-Gruppe deutlich geringer ausgeprägt (vgl. Abbildung 43). Schlussfolgerungen wurden häufig getätigt, um die Reduktion und Oxidation durch Angabe der Oxidationsstufen zu erklären und im Sinne des „tiefen Verstehens“ (vgl. Lind et al., 2004; Schmalhofer, 1996) eine gehaltreiche Beziehung zwischen den Ebenen herzustellen. Dabei nutzten die Probanden vorrangig die Testinhalte auf Teilchenebene und vollzogen einen bewussten Wechsel in Richtung Stoffebene (vgl. Tabelle 75), der in dieser Kategorie sowohl bei der Simulations- als auch bei der AR-Gruppe überwiegend positiv einzustufen ist.

Tabelle 75. Ausgewähltes Ankerbeispiel des Prätests von Proband 23 der Simulations-Gruppe aus Subkategorie 3.2.1.1 *Schlussfolgern auf Teilchenebene*.

Ausgewähltes Ankerbeispiel

Prätest

„(Da) der Schüler [...] *expliziert Hg* mit dazu geschrieben hat, gehe ich davon aus, dass sie sich *ehrer auf die Teilchenebene* vielleicht fokussieren wollte, vor allem, weil sie im Anschluss mit den *lonen* weitermacht. *Deshalb* passen die *Eigenschaften silbrig glänzend* nicht dazu.“

(Aufgabe 5; Proband 23 der Simulations-Gruppe)

Dennoch wurden die bereits in den vorherigen Kategorien angeführten Problematiken im Umgang mit der Teilchenebene auch in den Codings von Kategorie 3.2.1.1 sichtbar. Der Prä-Post-Vergleich beider Gruppen liefert erste Tendenzen, dass nach dem Treatment insgesamt für Schlussfolgerungen bewusster mit der Teilchenebene umgegangen wurde, indem Koeffizienten und Oxidationszahlen sowie Fachbegriffe stärker fokussiert wurden. Jedoch verweist das Datenmaterial auch noch im Posttest auf fehlerhafte bzw. mangelnde Differenzierungen von Stoff- und Teilchenebene, die vor allem in Aufgabe 3 zum Hochofen diagnostiziert wurden. Die Codierungen der Kategorien 3.2.1.2 *Schlussfolgern auf Stoffebene* und 3.2.1.3 *Schlussfolgern auf Stoff- und Teilchenebene* bestätigen die bereits geschilderten Schwierigkeiten zu Messzeitpunkt 1 sowie die ersichtliche Positiventwicklung der AR-Gruppe nach dem Treatment. Bei der Simulations-Gruppe hingegen bleiben die Aussagen von Messzeitpunkt 1 auf 2 häufig auf einem gleichen Niveau. Tabelle 76 demonstriert für den Posttest, exemplarisch an Versuchsperson 15 der AR-Gruppe, den gewissenhaften Umgang mit der Stoffebene beim Schlussfolgern. Bei Versuchsperson 21 der Simulations-Gruppe offenbart das Ankerbeispiel

aus Tabelle 76, dass die Schlussfolgerung auf Stoffebene akzeptabel, aber inhaltlich ausbaufähig (z.B. durch die zusätzliche Nennung von Stoffeigenschaften) ist.

Tabelle 76. Ausgewählte Ankerbeispiele des Posttests von Proband 15 der AR-Gruppe und Proband 21 der Simulations-Gruppe aus Subkategorie 3.2.1.2 *Schlussfolgern auf Stoffebene*.

Ausgewählte Ankerbeispiele	
AR	Posttest „Und dadurch verändert sich die <i>Struktur des Moleküls</i> . Und <i>dadurch</i> wirkt die Farbe dann <i>blau auf Stoffebene</i> .“
	(Aufgabe 1; Proband 15)
Sim	„Ich würde einfach schreiben, bei der Reaktion, wenn man <i>auf Stoffebene</i> bleiben will, von Kupferoxid mit Eisen erhält man als <i>Produkt Eisenoxid mit roten Kupferkügelchen</i> .“
	(Aufgabe 5; Proband 21)

Ergebnis nennen. Obwohl Kategorie 3.2.2 deutlich macht, dass das Elaborationsverhalten bezogen auf die Statementhäufigkeiten von Prä- auf Posttest insgesamt abnahm (Tabelle A27 in Anhang A.3.3.1), scheint die Qualität der Aussagen zugenommen zu haben. Wohingegen im Prätest vorrangig bei der MC-Aufgabe, des Öfteren falsche oder unbegründete Ergebnissenennungen diagnostiziert wurden, waren die Resultate des Posttests inhaltlich aussagekräftiger und ausgereifter (vgl. Tabelle 77).

Tabelle 77. Prä-Post-Vergleich mit ausgewählten Ankerbeispielen von Proband 5 der AR-Gruppe aus Subkategorie 3.2.2 *Ergebnis nennen*.

Ausgewählte Ankerbeispiele von Proband 5 der AR-Gruppe	
Prätest „Das finde ich jetzt eigentlich in Ordnung.“	Posttest „[...] aus Fe_2O_3 und 3 CO entsteht dann 2 Fe + 3 CO_2 [...] in der Vorwärmzone 2 CO.“
(Aufgabe 5)	(Aufgabe 3)

Inhaltliche Fragen an sich selbst. Die qualitative Untersuchung von Kategorie 3.2.3 demonstriert, dass beide Gruppen zum ersten Messzeitpunkt allgemeine Fragen bezogen auf Stoff- und Teilchenebene stellten. Nach Bearbeitung der jeweiligen Lernumgebung konzentrierten sich die Fragen in der Grundgesamtheit mehr auf die Fachinhalte selbst (vgl. Tabelle 78).

Tabelle 78. Prä-Post-Vergleich in der Grundgesamtheit mit ausgewählten Ankerbeispielen von Proband 15 und Proband 2 der AR-Gruppe aus Subkategorie 3.2.3 *Inhaltliche Frage an sich selbst*.

Ausgewählte Ankerbeispiele	
Prätest „[...] Wie komme ich von einem Zustand zum anderen, auf der <i>Teilchenebene</i> ?“	Posttest „Ach, weil das vielleicht ein <i>Ampholyt</i> ist?“
(Aufgabe 1; Proband 15 der AR-Gruppe)	(Aufgabe 1; Proband 2 der AR-Gruppe)

Diagnosen eigener Fehler beim Elaborieren. Die Häufigkeitsanalyse zeigt von Prä- auf Posttest eine erhöhte Anzahl an Codings in den Subkategorien 3.2.5, die analog zu den Schlussfolgerungen eine Verschiebung von Teilchen- in Richtung Stoffebene demonstrieren. Werden die Entwicklungen der Elaborationen aus Kategorie 3.2.5.1 *Teilchenebene* von Prä- auf Posttest qualitativ analysiert, so tun sich, bedingt durch die Nutzung der repräsentativen Ebene, Veränderungen hinsichtlich des Umgangs mit Stoff- und Teilchenebene auf. In beiden Vergleichsgruppen wurde ersichtlich, dass die Probanden Aspekte wie Stöchiometrie oder Oxidationsstufen beim Aufstellen von Reaktionsgleichungen auf Teilchenebene häufig reflektierten oder, angesichts der Auswahlmöglichkeiten in den MC-Aufgaben, einst getätigte Aussagen revidierten. Dabei sind die Aussagen oftmals geprägt von sprachlichen Ungenauigkeiten wie der inkorrekten Nutzung von Fachbegriffen. Zum zweiten Messzeitpunkt scheint die Ausdruckweise durch punktuelle Einbindung von Fachbegriffen der Teilchenebene wie „Atome“ einem höheren sprachlichen Niveau zu entsprechen. Die beiden Gruppen weisen jedoch per se keine eindeutigen Unterschiede auf. Gleiches gilt für die Diagnosen auf Stoffebene, die vor allem in der AR-Gruppe von Messzeitpunkt 1 auf 2 häufiger getätigt wurden und vorrangig den Aufgaben 3 und 4 zum Hochofen und zur Galvanisierung entnommen wurden.

Äußerungen, die Unsicherheit ausdrücken. Unterkategorie 3.3 *Inferenzen, die über Stoff- und Teilchenebene hinausgehen* zeigt zwar nur marginale Unterschiede zwischen den Gruppen und Messzeitpunkten auf, macht aber erkenntlich, dass die AR-Gruppe von ersten auf zweiten Messzeitpunkt mehr weiterführende Gedanken sowie Unsicherheiten äußerte. Die Codings von Kategorie 3.3.5 *Äußerungen, die Unsicherheit ausdrücken* wurden vorrangig Aufgabe 3 zum Hochofen und Aufgabe 4 zur Galvanisierung des Posttests entnommen. Sie scheinen einen hohen Komplexitätsgrad für die Probanden zu besitzen. Entsprechend wurde nach Sichtung dieser Aufgabenbearbeitung deutlich, dass der Umgang mit der Teilchenebene, aufgrund mangelnden Fachwissens (s.u. Kapitel 12.4.1), nur schwer souverän zu meistern war.

Hauptkategorie 4: Reduktion von Detailwissen durch Streichung

Bei Betrachtung der Unterkategorien zur Reduktion von Detailwissen wird ersichtlich, dass in beiden Gruppen nach Bearbeitung der Lernumgebung mehr Zieldefinitionen und Schwerpunktsetzungen, jedoch weniger Detailreduktionen, vorgenommen wurden.

Zieldefinitionen. In Kategorie 4.1 zeigt die qualitative Inhaltsanalyse der Statements, dass eine tiefgehende Auseinandersetzung mit den Aufgabenstellungen stattgefunden hat und dies die Voraussetzung für die tatsächliche Beantwortung der Teilaufgaben war. Achteten die Probanden auf Operatoren und bestimmte inhaltliche Details (z.B. Nennen der Grenzen des verwendeten Modells in Aufgabe 1 des Prätests), so folgte vermehrt auch deren Bearbeitung. Im

Posttest fand diese Kategorie bei der AR-Gruppe vor allem für Gedankengänge zur Anfertigung von Skizzen Anwendung. Der Gruppen- und Prä-Post-Vergleich liefert jedoch keine Effekte.

Schwerpunktsetzungen. Wird die Differenzierung der zugehörigen Subkategorien von 4.2 fokussiert, so konnten bei der AR-Gruppe starke Veränderungen hinsichtlich des Umgangs mit der Stoff- und Teilchenebene diagnostiziert werden. In beiden Gruppen wurden nach dem Treatment Schwerpunktsetzungen weniger auf Teilchenebene und mehr auf Stoffebene getätigt, wobei nur das AR-Setting eine Auseinandersetzung mit dem Stoff-Teilchen-Ebenenwechsel begünstigen zu scheitert (vgl. Abbildung 44). Dies lässt sich exemplarisch mit der Coding-Abnahme von 13.97 % in der AR-Gruppe und 3.30 % in der Simulations-Gruppe hinsichtlich der Schwerpunktsetzungen auf Teilchenebene bestätigen.

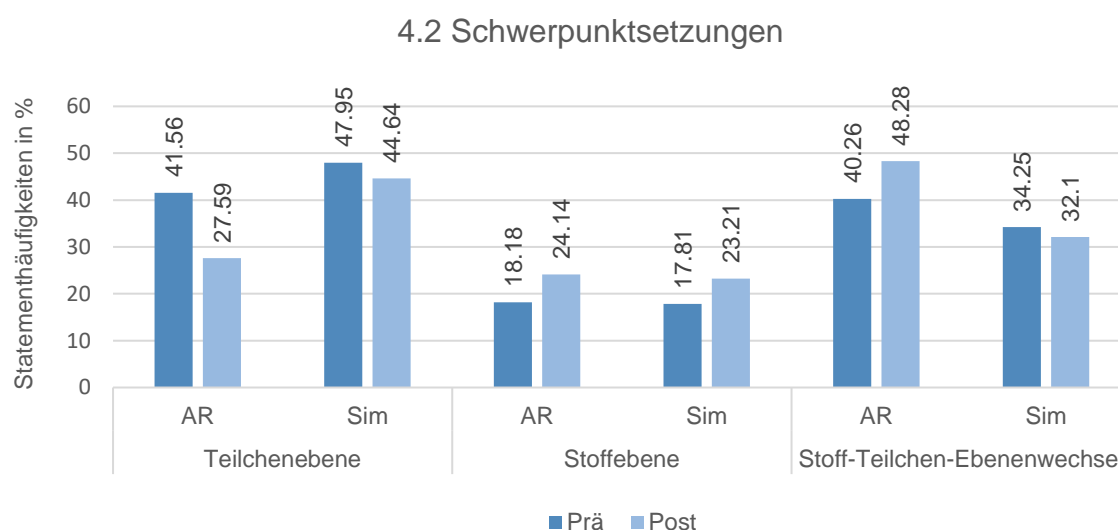


Abbildung 43. Übersicht der relativen Statementhäufigkeiten in Prozent aus KAT 1 der AR- und Simulations-Gruppe (AR und Sim) zu Messzeitpunkt 1 und 2 für die Subkategorien von 4.2 *Schwerpunktsetzungen* mit ihrer Grundgesamtheit an Statements aus Prä- und Posttest ($N_{Prä} = 150$, $N_{Post} = 114$).

Inhaltlich belegen die Daten, dass beide Vergleichsgruppen mit den Schwerpunktsetzungen auf Teilchenebene ihre Schilderungen bewusst von der Stoffebene abgrenzten. Werden die Testbearbeitungen von Messzeitpunkt 1 mit 2 verglichen, so wurde nach dem Treatment eine stärkere Konzentration der AR-Gruppe auf das Teilchenmodell selbst und bei der Simulations-Gruppe auf die chemische Formelsprache ersichtlich. Schwerpunktsetzungen auf Stoffebene erfolgten im Posttest vor allem bei der AR-Gruppe, indem Wortgleichungen, die im Prätest auf Teilchenebene betrachtet wurden, sodann der Stoffebene zugeordnet und inhaltlich ausführlichere Beschreibungen (z.B. Versuchsskizzen) angeführt wurden. Die qualitative Inhaltsanalyse der Aussagen von 4.2.3 *Schwerpunktsetzung Stoff-Teilchen-Ebenenwechsel* demonstriert die Vorstellungen der Probanden, wie man mit Stoff- und Teilchenebene umgehen sollte (vgl. Tabelle 79).

Tabelle 79. Ausgewähltes Ankerbeispiel des Prätests von Proband 4 der AR-Gruppe aus Subkategorie 4.2.3 Schwerpunktsetzung Stoff-Teilchen-Ebenenwechsel.

Ausgewähltes Ankerbeispiel

Prätest

„Eine typische Neutralisationsreaktion, die ich erstmal im Versuch auf der Stoffebene durchführe und dann wieder auf Teilchenebene versuche zu erklären.“

(Aufgabe 2; Proband 4 der AR-Gruppe)

Demnach veranschaulicht das in Tabelle 79 angeführte Ankerbeispiel des Prätests, dass Proband 4 den Stoff-Teilchen-Ebenenwechsel anvisiert und folglich dessen Wichtigkeit erkannt hat, jedoch nähere Erklärungen zur Differenzierung der Ebenen (z.B. Erwähnung der Superlupe) unberücksichtigt bleiben. Im Posttest waren die Aussagen, insbesondere bei Aufgabe 1 zum Farbstoff Cyanidin, inhaltlich ausführlicher. Ferner wurden Wechsel zwischen Stoff- und Teilchenebene gezielter in die Erklärungen eingebunden (vgl. Ankerbeispiel in Tabelle 80).

Tabelle 80. Ausgewähltes Ankerbeispiel des Posttests von Proband 8 der AR-Gruppe aus Subkategorie 4.2.3 Schwerpunktsetzung Stoff-Teilchen-Ebenenwechsel.

Ausgewähltes Ankerbeispiel

Posttest

„Also auf der Stoffebene sieht man eben, dass auf dem einen Schlüssel sich eine Chromschicht ablagert. Und auf Teilchenebene würden die Chromionen zum Schlüssel diffundieren und dort die Ionen, die Sulfationen abgeben, dann aufnehmen.“

(Aufgabe 4; Proband 8 der AR-Gruppe)

Reduktion von Detailwissen. Auch Unterkategorie 4.3 demonstriert, dass sich von ersten auf zweiten Messzeitpunkt das Elaborationsverhalten der AR-Gruppe von der Teilchenebene in Richtung Stoffebene verlagerte, wohingegen die Simulations-Gruppe im Posttest sogar etwas mehr Detailreduktionen auf Teilchenebene und weniger auf Stoffebene vornahm (vgl. Abbildung 45).

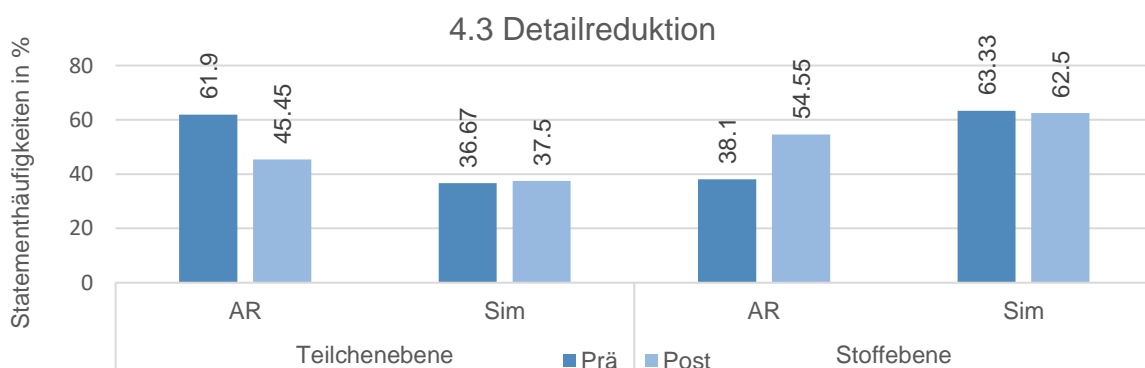


Abbildung 44. Übersicht der relativen Statementhäufigkeiten in Prozent aus KAT 1 der AR- und Simulations-Gruppe (AR und Sim) zu Messzeitpunkt 1 und 2 für die Subkategorien von 4.3 *Detailreduktion* mit ihrer Grundgesamtheit an Statements aus Prä- und Posttest ($N_{Prä} = 51$, $N_{Post} = 27$).

Die qualitative Inhaltsanalyse von Subkategorie 4.3.1 *Detailreduktion auf Teilchenebene* bestätigt erneut in beiden Gruppen die Schwierigkeiten mit den Ebenen, die sich vor allem auf inkorrekten Aussagen zur Redundanz von Symbolen wie Koeffizienten, stützen. Voreilig scheinen die Probanden Informationen in ihrem Elaborationsprozess auszuschließen, sodass sich eine uneinheitliche sowie obendrein undifferenzierte Nutzung der Ebenen anschloss. Zum zweiten Messzeitpunkt hat die AR-Gruppe mehr Erklärungen eingebunden, sodass die Ebenen gezielter und gewissenhafter verwendet wurden. Die Stoffebene wurde von den Probanden beider Vergleichsgruppen dann für unwichtig deklariert, wenn die Rolle der Teilchenebene betont werden sollte. Entsprechend ließen sich vor allem Statements der MC-Aufgaben dieser Kategorie zuordnen. Gruppenunterschiede sowie Änderungen von Prä- auf Posttest hinsichtlich der Qualität der Aussagen konnten nicht gemessen werden.

12.2.2 Einfluss der chemischen Fachsprache auf das Denken in den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000)

Die Ergebnisse aus Kapitel 12.2.1 deuten darauf hin, dass sich das Elaborationsverhalten hinsichtlich der Nutzung von Stoff- und Teilchenebene in den Vergleichsgruppen (AR vs. Simulation) zu beiden Messzeitpunkten voneinander abgrenzt. Dabei demonstrieren die Ergebnisse, dass sich der Umgang mit der repräsentativen Ebene von Prä- auf Posttest teilweise verbesserte. Die Analyse des Umgangs mit den (M)ER durch KAT 2 soll nun tiefergehend Aufschluss über das Denken in den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) geben.

Die Auswertung der Codierungen mit KAT 2 ergab bei den 10 Probanden der AR-Gruppe 2121 Statements, die den beiden Messzeitpunkten zuzuordnen waren. Davon wurden 1106 Probandenaussagen im Prätest und 1015 Statements im Posttest getätigt. Bei den 10 Versuchspersonen der Simulations-Gruppe wurden insgesamt 1930 Aussagen kategorisiert, von denen 970 auf den Prätest und 960 auf den Posttest fielen. Die Gruppenunterschiede hinsichtlich der Statementhäufigkeiten fielen in den Hauptkategorien von KAT 2 gering aus (vgl. Tabelle A34 in Anhang A.3.3.2). Die absoluten Häufigkeiten des Prätests verweisen auf sehr ähnliche Voraussetzungen der beiden Vergleichsgruppen hinsichtlich des Umgangs mit (M)ER. Die Begutachtung der Kategorisierungen von ersten auf zweiten Messzeitpunkt verdeutlicht, dass sich in beiden Gruppen eine Abnahme an Statements in Kategorie 1 bezogen auf das „suchorientierte Verstehen“ (vgl. Schmalhofer, 1996) diagnostizieren ließ. Zeitgleich konnte sowohl in der AR- als auch in der Simulations-Gruppe eine Zunahme an Codings in Kategorie 3 zum „verstehensorientierten Lernen“ (vgl. Schmalhofer, 1996) gemessen werden. Wenngleich die Statement-Anzahl in Kategorie 4 von ersten auf zweiten Messzeitpunkt bei der AR-Gruppe sank und bei der Simulations-Gruppe stieg, sind ihre Unterschiede nur minimal.

Hauptkategorie 1: Hinzufügen von Wissens-elementen durch Abruf zugehörigen Wissens aus dem Gedächtnis

Nennung von Wissens-elementen. Unterkategorie 1.1 *Nennung von Wissens-elementen, die nicht in der gerade behandelten Aufgabe behandelt werden* zeigt von Prä- auf Posttest eine reduzierte Anzahl an Codings um 7.33 % in der AR-Gruppe auf, wohingegen die Simulations-Gruppe mit einer Zunahme von 7.03 % mehr Aussagen tätigte. Dabei stützen sich die Aussagen beider Gruppen vorrangig auf den Abruf von Informationen aus dem Vorwissen, die von Prä- auf Posttest in beiden Gruppen, aber vor allem in der Simulations-Gruppe, abnahmen und sich vorrangig auf die Nennung von Wissens-elementen aus der Lernumgebung verlagerten.

Suche nach Beziehungen. Überdies wurden von Messzeitpunkt 1 auf 2 in beiden Gruppen weniger Suchen nach Beziehungen angestellt.

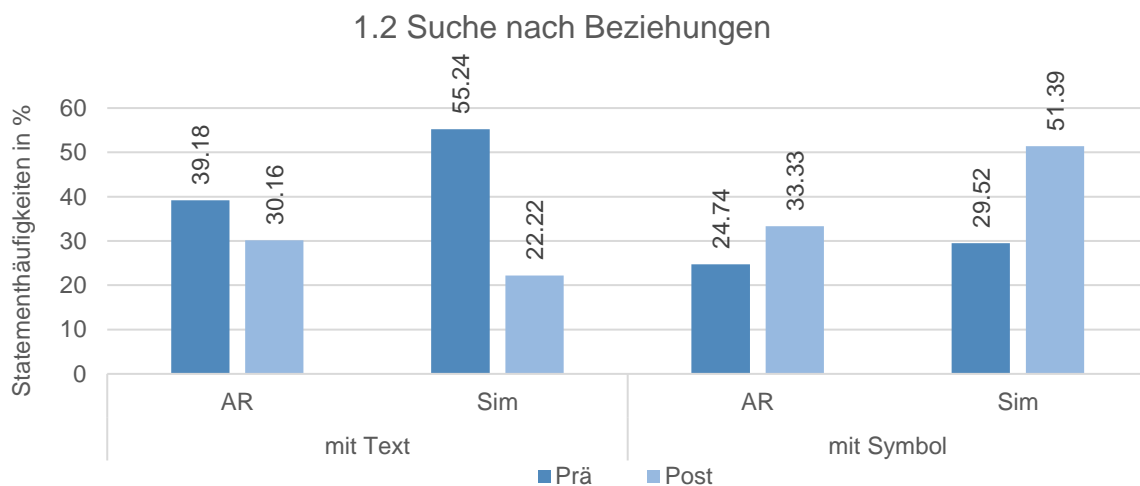


Abbildung 45. Übersicht der relativen Statementhäufigkeiten in Prozent aus KAT 2 der AR- und Simulations-Gruppe (AR und Sim) zu Messzeitpunkt 1 und 2 für die Subkategorien von 1.2 *Suche nach Beziehungen* mit ihrer Grundgesamtheit an Statements aus Prä- und Posttest ($N_{Prä} = 202$, $N_{Post} = 135$).

Abbildung 46 demonstriert in beiden Gruppen einen ähnlichen Trend, bei dem die Probanden nach dem Treatment weniger mit den Texten und mehr mit den Symbolen der Testaufgaben nach Beziehungen suchten. Demgemäß ließ sich in der AR-Gruppe eine Abnahme von 9.02 % bei den Texten und eine Zunahme von 8.59 % bei den Symbolen messen. Im Vergleich dazu wurden wesentlich höhere prozentuale Unterschiede mit 33.02 % hinsichtlich der Texte und mit 21.87 % bezogen auf die Symbole in der Simulations-Gruppe diagnostiziert. Das Datenmaterial deutet insgesamt darauf hin, dass das Treatment vorrangig bei der Simulations-Gruppe Verhaltensentwicklungen in Hinblick auf das suchorientierte Lernen erzeugte. Folglich schloss sich die qualitative Inhaltsanalyse der Codierungen an, die jedoch keine Gruppenunterschiede im Umgang mit Text und Symbol aufdeckte. Werden Messzeitpunkt 1 und 2 über beide Gruppen hinweg miteinander verglichen, so scheint sich das Elaborationsverhalten im

Allgemeinen verändert zu haben. Tabelle 81 demonstriert, dass die Versuchspersonen im Prätest mit den Texten der Testinhalte nach Beziehungen suchten, um Bezüge zur Stoff- oder Teilchenebene herstellen zu können. Dabei fokussierten sie Textabschnitte oder Begrifflichkeiten wie „aquatisiert“ für die Ebenentrennung (vgl. Tabelle 81).

Tabelle 81. Ausgewähltes Ankerbeispiel des Prätests von Proband 25 der Simulations-Gruppe aus Subkategorie 1.2.1 *Suche nach Beziehungen mit dem Text*.

Ausgewähltes Ankerbeispiel

Prätest

„Und dieses *Aquatisierte* kann ich ehrlich gesagt gerade nicht so genau zuordnen, ob man das zum-, ob man das der *Stoff oder der Teilchenebene* zuordnet. Aber man muss ja sagen, dass *Aggregatzustände sind ja Eigenschaften*. Oder nein, *es sind keine Eigenschaften*, sondern das *ordnet man der Teilchenebene* zu. Denn die Teilchen befinden-, nein die *Aggregatzustände sind auf jeden Fall Stoffebene*. Und auf Teilchenebene würde man dann eben beschreiben, wieviel Abstand *zwischen den Teilchen* sind und so weiter.“

(Aufgabe 5; Proband 25 der Simulations-Gruppe)

Die Untersuchung des Datenmaterials deckt auf, dass die Suche nach Beziehungen mit dem Text im Posttest vermehrt die Klärung der Fachinhalte selbst intendierte. Angesichts dessen finden sich die Aussagen dieser Subkategorie, neben der MC-Aufgabe, vor allem in Aufgabe 3 zum Hochofen wieder (vgl. Tabelle 82). Die Codierungen hinsichtlich der Suche nach Beziehungen mit dem Symbol untermauern die Ergebnisse von 1.2.1 *Suche nach Beziehung mit dem Text*.

Tabelle 82. Ausgewähltes Ankerbeispiel des Posttests von Proband 20 der AR-Gruppe aus Subkategorie 1.2.1 *Suche nach Beziehungen mit dem Text*.

Ausgewähltes Ankerbeispiel

Posttest

„So, Vorwärmzone. (12 Sek.) Ja, spannend ist doch, dass wir hier *Begriffe* finden, in diesen Kästchen, die wir vorher gar nicht haben. Also wo wir jetzt überlegen müssen, *wo kommen wir jetzt*-. Diese *Vorwärmzone, die Schmelzzone und die Reaktionszone [...]* (8 Sek.).“

(Aufgabe 3; Proband 20 der AR-Gruppe)

Hauptkategorie 3: Hinzufügen von Wissen durch Wissenserzeugung mittels Inferenzen

Der Gruppenvergleich bezüglich der Codierungen von 3.1 *Inferenzen, die dem Aufbau einer Textbasis oder visuellen Vorstellung dienen* zeigt minimale Unterschiede, wobei nach dem Treatment in beiden Gruppen eine Zunahme an Statements gemessen wurde. Jedoch ließ sich im Posttest eine geringere Anzahl an Statements der Simulations-Gruppe dieser Unterkategorie zuweisen, wohingegen die AR-Gruppe insgesamt mehr Aussagen hinsichtlich des „oberflächlichen Lernens“ veräußerte.

Paraphrasieren und Herstellen von Beziehungen. Mit sehr vergleichbaren Ausgangsbedingungen wurde diagnostiziert, dass beide Gruppen nach dem Treatment weniger paraphrasieren. Die AR-Gruppe stellt im Posttest zudem mehr und die Simulations-Gruppe weniger Beziehungen zwischen Text und Symbol her. Die Übersetzungsleistungen konzentrierten sich, trotz der Möglichkeit in Bildern zu paraphrasieren, auf Text und Symbol (vgl. Abbildung 47). Entsprechend ließ sich von Prä- auf Posttest eine gestiegene Anzahl an Codings hinsichtlich der Paraphrasierungen aus Text in Text mit einer Zunahme von > 9.6 % in beiden Gruppen messen. Im Vergleich dazu nahmen die Übersetzungen von Text in Symbol und umgekehrt in beiden Vergleichsgruppen ab. Lediglich in Bezug auf das Herstellen von Beziehungen zwischen den ER scheint das Treatment die AR-Gruppe etwas stärker angeregt zu haben (vgl. Abbildung 47).

3.1.1 Paraphrasieren und 3.1.2 Herstellen von Beziehungen

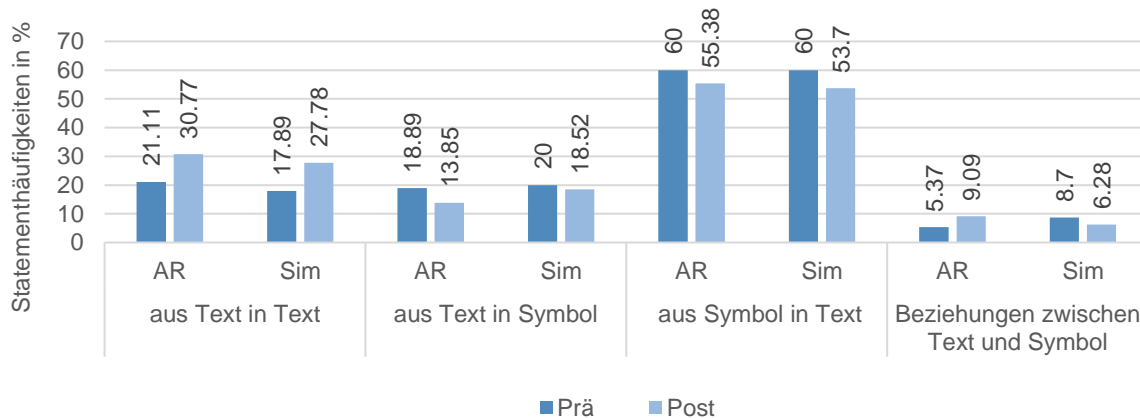


Abbildung 46. Übersicht der relativen Statementhäufigkeiten in Prozent aus KAT 2 der AR- und Simulations-Gruppe (AR und Sim) zu Messzeitpunkt 1 und 2 für die Subkategorien von 3.1.1 *Paraphrasieren* und 3.1.2 *Herstellen von Beziehungen* mit ihren Grundgesamtheiten an Statements aus Prä- und Posttest (Kategorie 3.1.1: $N_{Prä} = 185$, $N_{Post} = 119$ und 3.1.2: $N_{Prä} = 89$, $N_{Post} = 104$).

Wirft man einen Blick in die Aussageninhalte, so lassen sich weder zwischen den Gruppen noch zwischen den Messzeitpunkten bei 3.1.1.1 *aus Text in Text* Unterschiede erkennen. Ihre Translationen fußten überwiegend auf Fachbegriffen, die mittels textlicher Definitionen umschrieben wurden (vgl. Anhang). Die Paraphrasierungen in Kategorie 3.1.1.1 wurden insbesondere im Prätest für Bezugnahmen zu Stoff- und Teilchenebene genutzt. Im Posttest wurde zwar durch den Umgang mit den Texten häufig der Stoff-Teilchen-Ebenenwechsel intendiert, jedoch konkretisierten die Probanden dies im Vergleich zu Messzeitpunkt 1 weniger (vgl. Tabelle 83).

Tabelle 83. Prä-Post-Vergleich mit ausgewählten Ankerbeispielen von Proband 33 der Simulations-Gruppe aus Subkategorie 3.1.1.1 *Paraphrasierungen aus Text in Text*.

Ausgewählte Ankerbeispiele von Proband 33 der Simulations-Gruppe

Prätest	Posttest
„[...] silbrig glänzende Schwermetall <i>sind Eigenschaften</i> , die das Quecksilber zwar <i>aus-sagen</i> , wo wir die <i>Stoffebene betrachten</i> .“	„Also <i>Koks ist ja nichts Anderes als Kohlenstoff</i> .“
(Aufgabe 5)	(Aufgabe 3)

Die Betrachtung von Subkategorie 3.1.1.2 liefert keine wesentlichen Erkenntnisse hinsichtlich der Qualität der Aussagen. Die Texte der Aufgaben wurden sowohl in Prä- als auch in Posttest in beiden Gruppen vorrangig gewählt, um diese in Summen- oder Partikelformen zu transferrieren. Strukturformeln wurden dabei tendenziell weniger verwendet. Letztlich visierten die Paraphrasierungen überwiegend das Aufstellen von Reaktionsgleichungen an, weswegen die Probanden stärker auf Molekül- oder Ionenformeln zurückgriffen. Dabei bewegten sich die Probanden, beispielsweise in Hinblick auf Elektronenübergänge, größtenteils auf Teilchenebene und gingen auf den Stoff-Teilchen-Ebenenwechsel nie explizit ein. Der Bezug zur submikroskopischen oder makroskopischen Ebene wurde dagegen bei den Paraphrasierungen von Symbol in Text ersichtlicher. Obgleich die Übersetzungen aus qualitativer Perspektive, aufgrund uneinheitlicher Ausdrucksweisen, teilweise unpräzise waren, wurde durch die bewusste Nutzung von Fachbegriffen wie „Molekül“ oder „Atom“ sowie der Einbindung von Fachbegriffen wie „Protonierung“ die Teilchenebene konkret betont und zur Stoffebene abgegrenzt. Im Posttest schienen die Probanden in ihren Texten häufiger und wesentlich bewusster auf die Stoffebene zu achten (vgl. Tabelle 84). Im Gruppenvergleich haben sich jedoch keine eindeutigen Unterschiede hinsichtlich der Entwicklungen des Elaborationsverhaltens manifestiert.

Tabelle 84. Prä-Post-Vergleich mit ausgewählten Ankerbeispielen von Proband 4 der AR-Gruppe aus Subkategorie 3.1.1.4 *Paraphrasierungen von Symbol in Text*.

Ausgewählte Ankerbeispiele von Proband 21 der Simulations-Gruppe

Prätest	Posttest
„Also bei der <i>Oxidation oxidieren Quecksilber-Atome</i> und geben dabei je zwei <i>Elektronen ab</i> . Und es entstehen <i>Quecksilber-Kationen</i> [...] <i>reagieren zu Stickstoffmonoxid-Molekülen und Sauerstoff-Anionen</i> [...]“	„Also <i>auf Stoffebene</i> wird ein <i>Salz mit Kohlenstoff umgesetzt</i> .“
(Aufgabe 5)	(Aufgabe 3)

Auch Subkategorie 3.1.2 zum Herstellen von Beziehungen zwischen ER demonstriert die Bedeutsamkeit des adäquaten Umgangs mit der repräsentativen Ebene zur Differenzierung von Stoff- und Teilchenebene.

Tabelle 85. Prä-Post-Vergleich mit ausgewählten Ankerbeispielen von Proband 4 der AR-Gruppe aus Subkategorie 3.1.2 *Herstellen von Beziehungen zwischen Text und Symbol*.

Ausgewählte Ankerbeispiele von Proband 4 der AR-Gruppe	
Prätest	Posttest
„Auf <i>Teilchenebene</i> versuche ich das immer so zu erklären, dass bei der <i>Neutralisation</i> eben immer ein <i>Salz und Wasser</i> entstehen.“	„Wenn es <i>angesäuert</i> wird, <i>nimmt</i> der Farbstoff <i>Protonen auf</i> und <i>verändert sich</i> dadurch <i>nach Rot</i> .“
(Aufgabe 2)	(Aufgabe 1)

Tabelle 85 zeigt ein Ankerbeispiel von Proband 4, welches durch die Verknüpfung des Fachbegriffs „Neutralisation“ und beispielsweise der Summenformel von Ammoniumchlorid in der Testaufgabe prototypisch die Zentralisierung auf die Teilchenebene vorstellt. Dabei fußen die kognitiven Verarbeitungsprozesse der Testperson auf dem Rückgriff auf bestehende Wissensselemente aus dem Gedächtnis (z.B. „Salz“-Begriff). Es wird aber auch ein Optimierungsbedarf aufgedeckt, da Proband 4 beispielsweise die Teilchenebene erklären möchte, jedoch die feingliedrige Differenzierung durch Einbindung gezielter Begrifflichkeiten wie „Salz-Teilchen“ nicht schafft. Die Ausbaufähigkeit der Terminologie wurde vor allem im Prätest sehr deutlich. Im Posttest finden sich einige Aussagen wieder, die die Ebenen bedachter (teils vergeblich) voneinander abzugrenzen versuchen (vgl. Tabelle 85). Letztlich sind diese Ergebnisse aber sowohl von Prä- auf Posttest als auch zwischen den Gruppen schwer zu deuten.

Lösungswege beschreiben. Darüber hinaus wurden die Aussagen von 3.1.3 *Lösungswege beschreiben* hinsichtlich ihrer Quantifizierungen näher untersucht. Werden die beiden Gruppen miteinander verglichen, so wurde von Prä- auf Posttest in der AR-Gruppe eine sehr geringe Abnahme mit 0.24 % und in der Simulations-Gruppe eine deutliche Zunahme mit 10.16 % bezüglich der Anzahl der Statements gemessen. Das Datenmaterial zum Beschreiben der Lösungswege liefert, bezogen auf die Wahl der (M)ER, in beiden Gruppen eine ähnliche Entwicklung des Elaborationsverhaltens (vgl. Abbildung 48). Entsprechend griffen die Probanden im Posttest weniger auf den Text und mehr auf das Symbol oder deren Verknüpfung zurück. Bei der Anwendung von (M)ER zur Beschreibung der Lösungswege wurden zwar von ersten auf zweiten Messzeitpunkt allgemeinen weniger Texte oder/und Bilder in Kombination mit Symbolen genutzt, jedoch ließen sich kleine Gruppenunterschiede messen. Demnach wurde bei der AR-Gruppe eine Zunahme an Statements hinsichtlich der Anwendung von Symbol oder der Verknüpfung aus drei ER ersichtlich. Das Elaborationsverhalten der Simulations-Gruppe hingegen entwickelte sich durchweg so, dass die Probanden die Vielfalt aller (M)ER für ihre Beschreibungen verwendeten und vor allem auf die Kombination von Text und Symbol zurückgriffen (vgl. Abbildung 48).

3.1.3 Lösungswege beschreiben

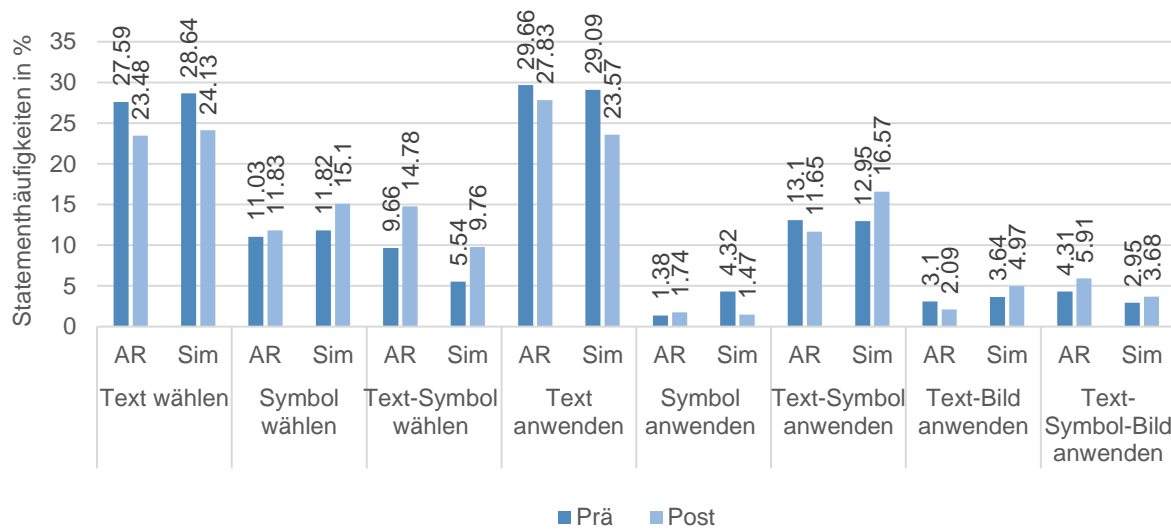


Abbildung 47. Übersicht der relativen Statementhäufigkeiten in Prozent aus KAT 2 der AR- und Simulations-Gruppe (AR und Sim) zu Messzeitpunkt 1 und 2 für die Subkategorien von 3.1.3 *Lösungswege beschreiben* mit ihrer Grundgesamtheit an Statements aus Prä- und Posttest ($N_{Prä} = 1020$, $N_{Post} = 1118$).

In der AR-Gruppe wurden einzelne Fälle gefunden, die bereits zum ersten Messzeitpunkt Texte für ihre Erklärungen zu Stoff- und Teilchenebene nutzten. Jedoch fiel diesen Versuchspersonen die explizite Ebenentrennung im Prätest schwer.

Tabelle 86. Prä-Post-Vergleich mit ausgewählten Ankerbeispielen von Proband 3 der AR-Gruppe aus Subkategorie 3.1.3.1 *Text wählen*.

Ausgewählte Ankerbeispiele von Proband 3 der AR-Gruppe-Gruppe

Prätest

„[...] Da gehen die *Hydroxidionen* hin und geben Elektronen ab. Und es entsteht *Sauerstoff, Gas und Wasser bei der Abgabe der Elektronen. Stoff- und Teilchenebene. Man kann auf der einen Seite sehen, beim Schlüssel, [...]* (der) vorher *kupferfarben war oder messingfarben, dass der sich mehr oder weniger gleichmäßig mit Chrom überzieht [...]*“

(Aufgabe 4)

Posttest

„Und Chrom-Sulfat ist mit Sicherheit auch irgendwie farbig, dass man da ein *Abnehmen der Farbigkeit sieht*, sodass man auch *daraus schließen kann, dass da die Anzahl der Chrom-Ionen in Lösung sich verringert.*“

(Aufgabe 2)

Tabelle 86 macht deutlich, dass Proband 3 der AR-Gruppe vor dem Treatment einen Wechsel von der Teilchen- in die Stoffebene anstrebte, dieser jedoch aufgrund der mangelnden Sprachfertigkeiten missglückte. Ausgehend von der Beschreibung der Hydroxidionen-Anlagerung sowie Oxidation wollte der Proband zur Versuchsbeobachtung beim Galvanisieren überführen, dabei fehlen aber Begriffe auf Teilchenebene, sodass das Denken in den Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) fehlerbehaftet zu sein scheint (vgl. Tabelle 86). Im Posttest hingegen verbesserte sich häufig die Qualität der Aussagen. Beispielsweise wählte Proband 3 erneut diesen Aufgabeninhalt und wechselte von Stoff- auf Teilchenebene, indem er die Ebenen zwar

nicht explizit nannte, aber differenzierter betrachtete (vgl. Tabelle 86). Auch die Aussagen von Kategorie 3.1.3.2 *Symbol wählen* zeigen ähnliche Ergebnisse in beiden Gruppen. Die qualitative Inhaltsanalyse der Probandenaussagen aus Kategorie 3.1.3.3 *Text und Symbol wählen* demonstrieren, dass die Probanden zu beiden Messzeitpunkten durch die kombinierte Wahl von Text und Symbol gewissenhaft mit Stoff- und Teilchenebene umgegangen sind. Bestätigt wird dieses Resultat durch die explizite Verwendung von Begriffen wie „Atom“ oder Differenzierungen zwischen Stoff- und Teilchenebene mittels geeigneter (M)ER (z.B. Texte und Symbole für Aggregatzustände zur Beschreibung der Stoffebene; vgl. Tabelle 87).

Tabelle 87. Ausgewähltes Ankerbeispiel des Prätests von Proband 3 der AR-Gruppe aus Subkategorie 3.1.3.1 *Lösungswege beschreiben: Text und Symbol wählen*.

Ausgewähltes Ankerbeispiel

Prätest

„Bleioxid und Kohlenstoff sind *beides Feststoffe*. Deswegen würde ich die Reaktionsgleichung direkt mal ergänzen. Und *das kleine s* in Klammern. Es entsteht Blei, welches auch *fest ist* und *Kohlenstoffdioxid*, welches *gasförmig ist*.“

(Aufgabe 2; Proband 3 der AR-Gruppe)

Überdies fällt in Kategorie 3.1.3.4 *Texte anwenden* auf, dass sich die Probanden zum ersten Messzeitpunkt intensiver mit den Ebenen auseinandersetzen und im Posttest teilweise mehr auf die fachliche Klärung abzielten, indem sich intensive Reflexionen gewisser chemischer und physikalischer Phänomene, beispielsweise zu den Stoffeigenschaften von edlen oder unedlen Metallen, anschlossen. Die qualitative Inhaltsanalyse von Kategorie 3.1.3.8 *Text-Symbol anwenden* verdeutlicht, dass die Verwendung von MER häufig Probleme hinsichtlich des Denkens in den Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) nach sich zog. Werden Texte und Symbol simultan verwendet, beispielsweise durch Erläuterungen zu Elektronenübergängen unter Zuhilfenahme von Partikelformeln, so werden Repräsentationswechsel zur differenzierten, einheitlichen Ausdrucksweise im Prätest selten vorgenommen, Fachbegriffe vernachlässigt und die verschiedenen ER der Stoff- und Teilchenebene unkontrolliert miteinander vermischt. Nach dem Treatment wurde stärker auf fachsprachlich präzise Ausdrucksweisen geachtet und folglich eine gezieltere Ebenentrennung vollzogen (vgl. Tabelle 88).

Tabelle 88. Prä-Post-Vergleich mit ausgewählten Ankerbeispielen von Proband 4 der AR-Gruppe aus Subkategorie 3.1.1.8 *Text-Symbol anwenden*.

Ausgewählte Ankerbeispiele von Proband 4 der AR-Gruppe	
<p>Prätest</p> <p>„Das heißt, es würde in dem Fall Kohlenstoff oxidiert und Blei reduziert. Das heißt, als nächstes stelle ich die Teilgleichungen auf. Erstmal die Oxidationsgleichung. Kohlenstoff wird oxidiert zu Kohlenstoffdioxid, weil sich die Oxidationszahl [...] Also, das bin ich jetzt erst einmal absolut bei der Teilchenebene.“</p> <p>(Aufgabe 4)</p>	<p>Posttest</p> <p>„[...] brauche ich wieder H₃O⁺ -Ionen und auf der linken Seite Wasser [...] während die Blei-Ionen, die ja die Oxidationsstufe plus vier haben, dann vier Elektronen nicht-, ja die Blei-Ionen natürlich, vier Elektronen aufnehmen können und dabei aus einem Blei-Ion ein elementares Blei-Atom entstehen würde [...]“</p> <p>(Aufgabe 2)</p>

Auch die Lösung der Ankeraufgabe zum Aufstellen der Teil- und Gesamtgleichungen von Proband 19 (vgl. Abbildung 49) demonstriert die Rolle der repräsentativen Ebene, bezogen auf die angewandten Texte und Symbole. Im Prätest wurde durch die Notation der Wortgleichung und der symbolischen Reaktionsgleichung implizit versucht zwischen Stoff- und Teilchenebene zu differenzieren. Kleine Veränderungen im Posttest deuten auf einen gewissenhaften Umgang mit der repräsentativen Ebene hin. Folglich wurde zum zweiten Messzeitpunkt die Wortgleichung auf Stoffebene mit den Aggregatzuständen ergänzt und explizit von der Teilchenebene abgegrenzt (s. Markierung in Abbildung 49).

Anwendung von Text und Symbol (Lösung von Proband 19)

Wortgleichung:

$$\overset{+II}{Pb} \overset{-II}{O_2} + \overset{0}{C} \rightarrow \overset{0}{Pb} + \overset{+II}{C} \overset{-II}{O_2}$$

Red: $Pb^{4+} + 4e^- \rightarrow Pb^0$

Ox.: $C + 2O^{2-} \rightarrow CO_2 + 4e^-$

Redox: $Pb^{4+} + C + 2O^{2-} \rightarrow CO_2 + Pb$

Aufgabe 4 des Prätests

↔

Wortgleichung: **Bleioxid (lsg)** + **Kohlenstoff (s)** → **Blei (s)** + **Kohlenstoffdioxid (g)**

Teilchenebene:

Reduktion: $Pb^{4+} + 4e^- \rightarrow Pb^0$

Oxidation: $C + \frac{1}{2} 2O^{2-} \rightarrow CO_2 + 4e^-$

Redoxgleichung: $C + Pb^{4+} + 2O^{2-} \rightarrow Pb + CO_2$

Aufgabe 2 des Posttests

Abbildung 48. Prä-Post-Vergleich der Testbearbeitung von Proband 19 der AR-Gruppe am Beispiel der Ankeraufgabe zur Gewinnung von Blei aus Subkategorie 3.1.3.8 *Lösungswege beschreiben: Text und Symbol anwenden*.

Die Codierungen von Kategorie 3.1.3.10 *Text, Symbol und Bild anwenden* untermauern den Trend, dass sich das Elaborationsverhalten hinsichtlich des Umgangs mit (M)ER in der AR-Gruppe von Messzeitpunkt 1 auf 2 verbessert hat. Abbildung 50 veranschaulicht die Entwicklung exemplarisch an den Testbearbeitungen der Ankeraufgaben zur Galvanisierung von Proband 10.

Anwendung von Text, Symbol und Bild (Lösung von Proband 10)

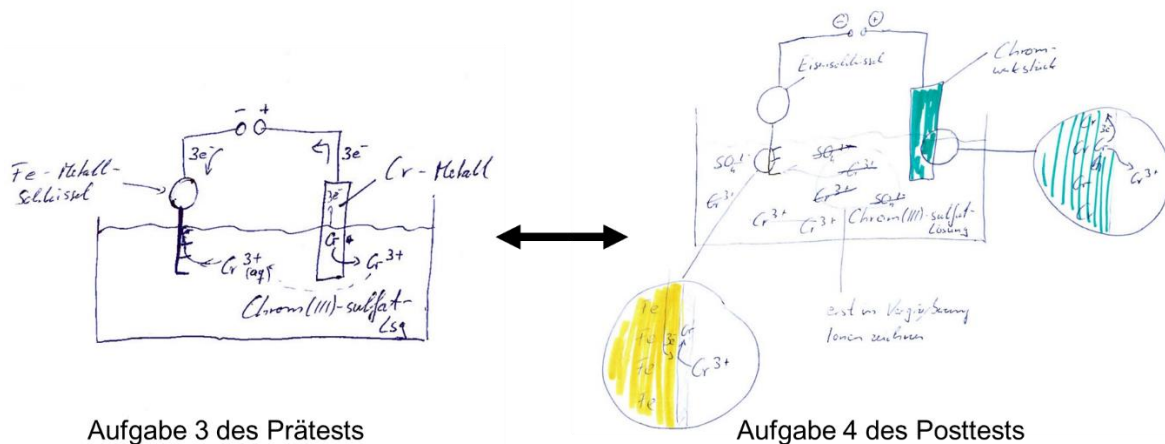


Abbildung 49. Prä-Post-Vergleich der Testbearbeitung von Proband 10 der AR-Gruppe am Beispiel der Ankeraufgabe zur Galvanisierung aus Subkategorie 3.1.3.10 *Lösungswege beschreiben: Text, Symbol und Bild anwenden*.

Wohingegen aus fachlicher Perspektive keine Unterschiede zu erkennen sind, lassen sich aus Gesichtspunkten der Chemiedidaktik Optimierungen im Umgang mit MER erkennen, da die Versuchsperson durch Einbindung der Super-Lupe in der Versuchsskizze konkret auf den Stoff-Teilchen-Ebenenwechsel abzielte (vgl. Abbildung 50). Dabei erklärte der Proband gewissenhaft das chemische Phänomen der Galvanisierung, indem er den Versuchsaufbau der Stoffebene dezidiert mit den Teilchenprozessen an den Elektroden verknüpfte. Die Testbearbeitung von Aufgabe 4 des Posttests demonstriert exemplarisch für die AR-Gruppe, dass die Anwendung von MER durch Einbezug der Super-Lupe ein erfolgsversprechendes Denken in den Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) bedingt. Dieser Effekt konnte in der Simulations-Gruppe nicht festgestellt werden.

Schlussfolgerungen und Diagnosen eigener Fehler beim Elaborieren. Die Kategorisierungen von 3.2 zum „tiefen Verstehen“ (Lind et al., 2004) weisen von ersten auf zweiten Messzeitpunkt einen Rückgang in beiden Gruppen auf, wobei die AR- bzw. Simulations-Gruppe mit einer prozentualen Differenz von 11.77 % bzw. 4.27 % im Posttest weniger schlussfolgerte und entsprechend mehr Fehlerdiagnosen anstellte (vgl. Tabelle A37 in A.3.3.2). Die Aufschlüsselung hinsichtlich der Schlussfolgerungen mit (M)ER ergab, dass beide Gruppen von Prä- auf Posttest weniger den Text und mehr das Symbol oder die Verknüpfung beider ER nutzten (vgl. Abbildung 51). Dabei scheint jedoch das AR-Setting eine stärkere Verhaltensänderung nach

sich gezogen zu haben, sodass die AR-Gruppe in deutlich geringerem Ausmaß Texte verwendete und sich dafür wesentlich stärker auf MER fokussierte.

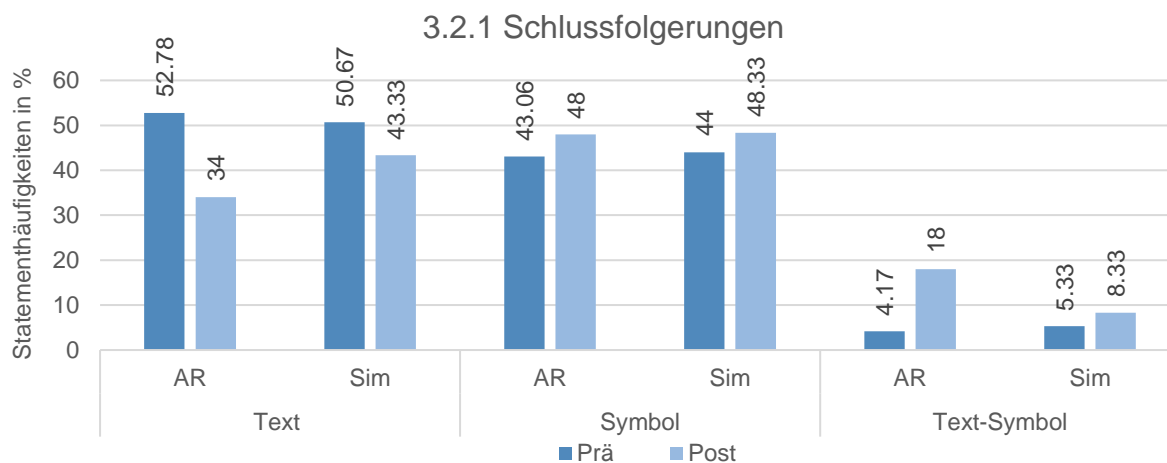


Abbildung 50. Übersicht der relativen Statementhäufigkeiten in Prozent aus KAT 2 der AR- und Simulationsgruppe (AR und Sim) zu Messzeitpunkt 1 und 2 für die Subkategorien von 3.2.1 *Schlussfolgerungen* mit ihrer Grundgesamtheit an Statements aus Prä- und Posttest ($N_{\text{Prä}} = 147$, $N_{\text{Post}} = 110$).

Auch die qualitative Inhaltsanalyse demonstriert, dass die Schlussfolgerungen mit den (M)ER von großer Bedeutsamkeit für die Erklärungen auf Stoff- und Teilchenebene sind. Wird Kategorie 3.2.1.1 *Text* näher begutachtet, so wird deutlich, dass die Probanden beider Gruppen nach Bearbeitung der jeweiligen Lernumgebung auf einem sprachlich höheren Niveau schlussfolgerten. Proband 11 versuchte beispielsweise zum ersten Messzeitpunkt die Verchromung auf Stoffebene zu beschreiben und mittels Teilchenebene zu erklären, jedoch wechselte er nicht angemessen zwischen den Ebenen und trennte diese folglich unzureichend voneinander. Im Posttest hingegen betonte er in dem Text explizit, dass die Fokussierung auf eine Ebene notwendig sei (vgl. Tabelle 89).

Tabelle 89. Prä-Post-Vergleich mit ausgewählten Ankerbeispielen von Proband 11 der AR-Gruppe aus Subkategorie 3.2.1.1 *Schlussfolgern mit Text*.

Ausgewählte Ankerbeispiele von Proband 11 der AR-Gruppe

Prätest

„[...] dass ich das *Chrom abscheiden* lasse. Also sprich, ich habe vorher die *Ionen* und möchte dann, dass daraus dann *ein Feststoff* ist, also sprich, die *Atome* entstehen.“

(Aufgabe 3)

Posttest

„Ja, man muss jetzt da wieder sich [...] für *eines entscheiden*. Wenn ich *Redoxreaktion* starte, dann muss ich *auf Teilchenebene* bleiben.“

(Aufgabe 5)

Kategorie 3.2.1.2 *Symbol* (ebenso 3.2.1.3 *Text und Symbol*) unterstreicht die bisherigen Ergebnisse hinsichtlich des Denkens in den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000). Dabei wurde festgestellt, dass die Schlussfolgerungen vorrangig auf Aufgabe 1 zurückzuführen sind und die Strukturformel häufig erfolgreich für den Umgang mit Stoff- und Teilchenebene genutzt wurde. Die uneinheitliche Verknüpfung von Text mit Symbol auf Basis des gewählten Symbols

verursachte im Prätest häufig unpräzise Ausdrucksweisen, die sich negativ auf die Trennung von Stoff- und Teilchenebene auswirkten. Im Posttest wurden derartige Aussagen weniger registriert und deuten auf eine Optimierung durch das Treatment hin, die vor allem in der AR-Gruppe zum Vorschein kam (vgl. Tabelle 90).

Tabelle 90. Prä-Post-Vergleich mit ausgewählten Ankerbeispielen von Proband 11 der AR-Gruppe aus Subkategorie 3.2.1.2 *Schlussfolgern mit Symbol*.

Ausgewählte Ankerbeispiele von Proband 11 der AR-Gruppe	
Prätest	Posttest
„Das bedeutet also, die <i>Salzsäurelösung</i> , die gibt ein Proton ab, also <i>HCl gibt ein Proton ab</i> .“	„Wenn ich noch einmal ein <i>Proton abgebe</i> , dann habe ich das hier an der Stelle das <i>Hyd-oxidion</i> .“
(Aufgabe 2)	(Aufgabe 1)

Diagnosen eigener Fehler. Die Verhaltensmuster der zwei Vergleichsgruppen beim Diagnostizieren grenzen sich stärker voneinander ab und erzeugen ein heterogeneres Bild. Zwar wurden in beiden Gruppen mehr Diagnosen mit MER angestellt, jedoch konzentrierte sich die AR-Gruppe weniger auf Texte und stärker auf Symbole, wohingegen die Simulations-Gruppe mehr auf Texte und weniger auf Symbole achtete (Abbildung 52).

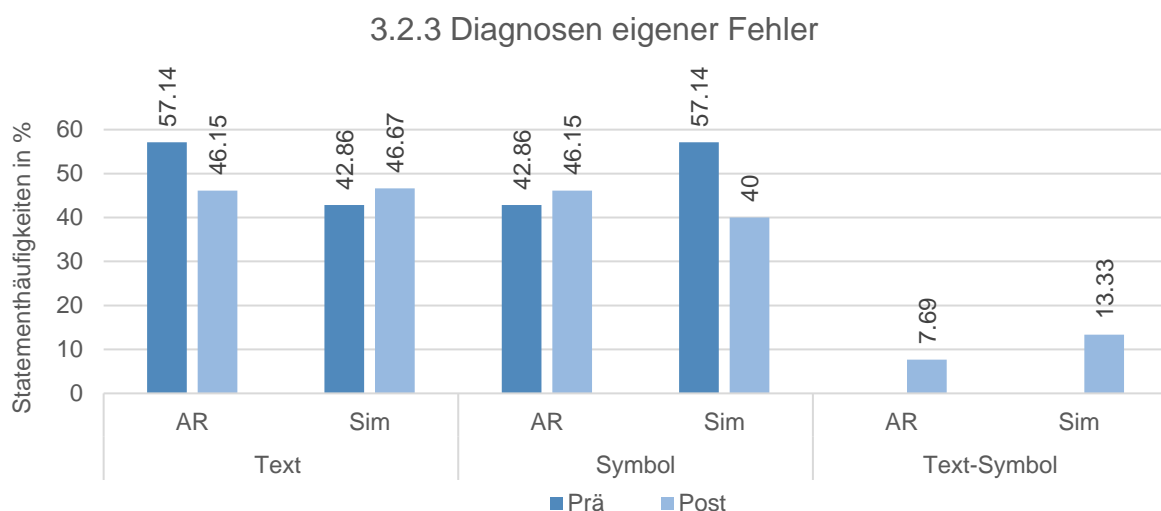


Abbildung 51. Übersicht der relativen Statementhäufigkeiten in Prozent aus KAT 2 der AR- und Simulations-Gruppe (AR und Sim) zu Messzeitpunkt 1 und 2 für die Subkategorien von 3.2.3 *Diagnose eigener Fehler* mit ihrer Grundgesamtheit an Statements aus Prä- und Posttest ($N_{Prä} = 21$, $N_{Post} = 28$).

Die Sichtung der Aussageninhalte ergab, dass Probanden, welche ihre Fehler auf repräsentativer Ebene erkannten, auch mit der Stoff- und Teilchenebene gewissenhafter umgingen. Dieser Effekt zeigt sich vor allem im Posttest (vgl. Tabelle 91).

Tabelle 91. Ausgewähltes Ankerbeispiel des Posttests von Proband 11 der AR-Gruppe aus Subkategorie 3.2.3.1 *Diagnosen eigener Fehler mittels Text.*

Ausgewähltes Ankerbeispiel

Posttest

„Hei, jetzt habe ich schon wieder *Stoff-, Teilchenebene verwechselt. Eisenoxidteilchen zu Eisenatomen. Und Kohlenmonoxid-Moleküle zu Kohlenstoffdioxid-Molekülen.* So müsste ich es ausdrücken.“

(Aufgabe 5; Proband 11 der AR-Gruppe)

Hauptkategorie 4: Reduktion von Detailwissen durch Streichung

Die Quantifizierungen aus Hauptkategorie verweisen von Prä- auf Posttest eine prozentuale Zunahme an Schwerpunktsetzungen um 16.77 % bzw. 31.86 % in der AR- bzw. Simulations-Gruppe (vgl. Kategorie 4.1 in Abbildung 53). Zeitgleich wurde eine Abnahme an Statements von > 14.70 % hinsichtlich der Detailreduktionen in beiden Gruppen gemessen.

Schwerpunktsetzungen. Die Schwerpunktsetzungen untermauern die bisherigen Ergebnisse zum Umgang mit (M)ER dahingehend, dass sich beide Gruppen nach Bearbeitung der jeweiligen Lernumgebung weniger auf Texte und mehr auf Symbole fokussierten, jedoch deren Kombination eher von der AR-Gruppe für wichtig erachtet wurde (vgl. Abbildung 53).

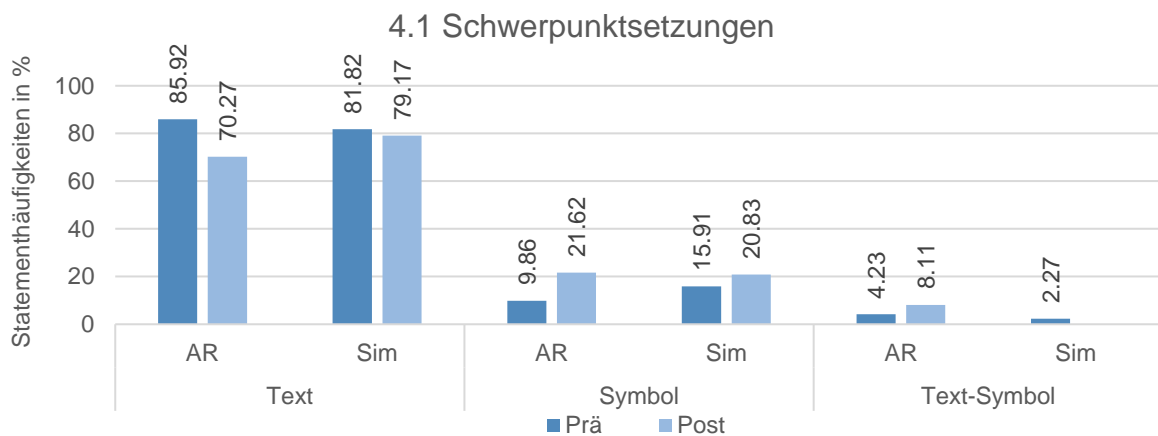


Abbildung 52. Übersicht der relativen Statementhäufigkeiten in Prozent aus KAT 2 der AR- und Simulations-Gruppe (AR und Sim) zu Messzeitpunkt 1 und 2 für die Subkategorien von 4.1 *Schwerpunktsetzungen* mit ihrer Grundgesamtheit an Statements aus Prä- und Posttest ($N_{Prä} = 115$, $N_{Post} = 146$).

Bezogen auf die Inhaltsanalyse der Schwerpunktsetzungen wurden keine Gruppenunterschiede festgestellt. Auffallend bei den Schwerpunktsetzungen zum Symbol ist, dass die Probanden bei Begutachtung der Strukturformel einzelne Aspekte wie zum Beispiel „Hydroxylgruppen“ gesondert wählten. Bei den anderen Formeltypen wurde das Symbol im Ganzen betrachtet. Die Aussagen der Subkategorien zu 4.1 unterstreichen ihre Wichtigkeit für das Denken in den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000), da Schwerpunktsetzungen vorrangig mit dem Ziel der Stoff-Teilchen-Ebenentrennung vorgenommen wurden. Demnach scheinen Symbole eine wichtigere Rolle einzunehmen.

Detailreduktionen. Von ersten auf zweiten Messzeitpunkt wurden Texte von der AR-Gruppe für unwichtiger und von der Simulations-Gruppe für bedeutsamer erachtet (vgl. Abbildung 54). Entsprechend nahm die AR-Gruppe im Posttest keine Detailreduktionen des Symbols vor, wobei die Anzahl der Codings in der Simulations-Gruppe leicht anstieg.

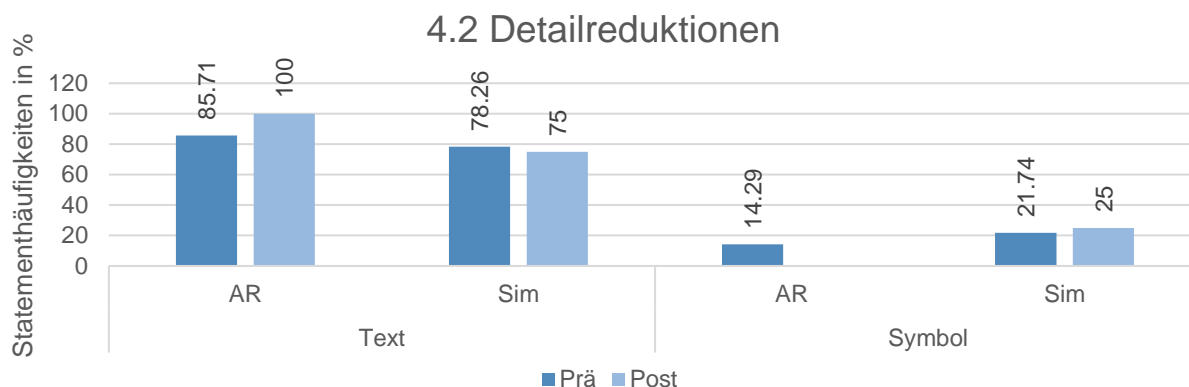


Abbildung 53. Übersicht der relativen Statementhäufigkeiten in Prozent aus KAT 2 der AR- und Simulations-Gruppe (AR und Sim) zu Messzeitpunkt 1 und 2 für die Subkategorien von 4.2 *Detailreduktionen* mit ihrer Grundgesamtheit an Statements aus Prä- und Posttest ($N_{Prä} = 44$, $N_{Post} = 12$).

Dieses Resultat der AR-Gruppe steht im Einklang mit den bisherigen Befunden, dass nach dem Treatment Symbole als ER oder in Form von MER an Bedeutsamkeit für die Elaboration gewonnen haben, wohingegen die Simulations-Gruppe Symbole nur selektiv gewichtete. Detailreduktionen (vgl. Kategorie 4.2) wurden vor allem zur Beantwortung der MC-Aufgaben getätigt. Folglich wurden Texte zu Stoffeigenschaften wie Farben gestrichen, um die Teilchenebene singulär zu betrachten. Umgekehrt wurden Texte zur Teilchenebene wie „Atom“ für unwichtig angesehen, wenn die Stoffebene betont werden sollte. Ein besonderes Augenmerk liegt auf der Reduktion von Summenformeln in den Schüleraussagen der MC-Aufgaben, ohne dabei den Mehrwert der zeitgleichen Verknüpfung unterschiedlicher Repräsentationen zu erkennen (vgl. Multiple-Representation-Principle von Mayer, 2021 in Kapitel 3.3). Auch wurden Koeffizienten als Kennzeichen der Teilchenanzahlen des Öfteren (fälschlicherweise) eliminiert.

12.2.3 Zusammenfassung der Ergebnisse zur Untersuchung der Auswirkungen von AR auf das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis (KAT 1 und KAT 2)

Das Datenmaterial verweist auf den Trend, dass beide Gruppen, aber vor allem die AR-Gruppe, intensiver auf Stoffebene elaborierten. Einerseits demonstrieren die Auswertungen der (Sub-) Kategorien 1 bis 4 mit KAT 1, dass von Messzeitpunkt 1 auf 2 mehr verstehensorientiert und weniger suchorientiert elaboriert wurde (vgl. Hauptkategorie 3 von KAT 1 in Kapitel 12.1). Dieses Ergebnis kommt vor allem in der AR-Gruppe zum Vorschein. Folglich veränderte sich die Qualität der Wissensabrufe sowie Beziehungssuchen und stützte sich größtenteils

nicht mehr auf Unsicherheiten mit den Ebenen selbst, sondern zielte häufiger auf die detailreiche Klärung der Fachinhalte ab. Andererseits deutet das Datenmaterial auf einen gewissenhafteren und sichereren Umgang mit der Stoffebene hin, der vor allem beim Beschreiben der Lösungswege oder Schlussfolgern ersichtlich wird. Auch die qualitativen Inhaltsanalysen verweisen in beiden Gruppen auf eine gewissenhaftere Elaboration hinsichtlich des Denkens in den Ebenen nach Johnstone (1993, 2000). Im Prätest wurden durchweg in allen Kategorisierungen Schwierigkeiten im Umgang mit Stoff- und Teilchenebene registriert, die häufig auf mangelnde Sprachfertigkeiten wie zum Beispiel der Vernachlässigung von Fachbegriffen oder der Vermischung unterschiedlicher (M)ER zurückzuführen waren. Vor allem der Ebenenwechsel stellte eine große Herausforderung dar, da Stoff- und Teilchenebene häufig unzureichend voneinander getrennt wurden und Hilfsmittel wie die Super-Lupe oder das exakte Nennen von Begriffen der Stoff- bzw. Teilchenebene wie „Gas“ oder „Atom“ zu oft unberücksichtigt blieben. Auf Basis der Häufigkeits- und Inhaltsanalysen wird ersichtlich, dass beide Gruppen nach dem Treatment mehr Beziehungen zwischen den Ebenen herstellten und infolgedessen dezidiertere Ebenenwechsel vornahmen. Zwar scheint der Posttest mit Aufgabe 3 zum Hochofen oder mit Ankeraufgabe 4 zur Galvanisierung aus fachlicher Perspektive komplexer für die Probanden gewesen zu sein. Dennoch gingen sie bedachter mit den Ebenen um, trennten diese gezielter und intendierten bewusstere Verknüpfungen zwischen diesen, die aufgrund fachsprachlicher Präzision auf ein optimiertes Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis hindeuten. Werden die Ergebnisse der Kapitel 12.2 und 12.3 zusammengeführt, so zeigt sich der Effekt vor allem in der AR-Gruppe. Die Analyse des Datenmaterials mit KAT 2 zur chemischen Fachsprache untermauert dieses Ergebnis. Entsprechend konnte ermittelt werden, dass von Prä- auf Posttest der bloße Text in den Hintergrund rückte. Stattdessen wurden tendenziell eher Symbole und MER, im Sinne von explizit angewandten Begrifflichkeiten wie „Atome“ und Symbolen wie Koeffizienten und ihrer einheitlichen Verwendung, gewichtet. Die Probanden scheinen die (M)ER im Posttest systematischer für ihre Erklärungen zu Stoff- und Teilchenebene zu nutzen, so dass erfolgreichere Ebenenwechsel begünstigt wurden. Obwohl sich die Probleme hinsichtlich des Denkens in den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) nach dem Treatment in beiden Gruppen nicht vollkommen beseitigen ließen, wurde größtenteils eine höhere Aussagenqualität gemessen. Die positiven Effekte im Umgang mit (M)ER wurden zwar in beiden Gruppen diagnostiziert, in Hinblick auf die kognitiven Verarbeitungsprozesse bei der Nutzung von Stoff- und Teilchenebene scheint aber das AR-Setting eine größere Wirkung auf die Elaborationsprozesse gehabt zu haben. Die AR-Gruppe grenzte sich dahingehend von der Simulations-Gruppe ab, dass sie nach dem Treatment sichtlich gewissenhafter mit der repräsentativen Ebene umging und erfolgreicher zwischen Stoff- und Teilchenebene differenzierte.

12.3 Gruppenvergleich zur Untersuchung der Auswirkungen der Interaktivität von AR auf das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis

Kapitel 12.2 konstatiert die Wirkung von AR auf das Denken in den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000). Jedoch gilt noch zu klären, inwiefern die Interaktivität mit AR-Repräsentationen das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis beeinflusst (vgl. FF3₂ und FF4₂ in Kapitel 5.3). Nachstehend werden in Anlehnung an das vorherige Kapitel bedeutsame Kategorien und ihre Befunde aus den Häufigkeits- und Inhaltsanalysen der AR- und HMD-AR-Gruppe (N = 40) von ersten und zweiten Messzeitpunkt detailliert vorgestellt. Eine vollständige Auflistung der Coding-Häufigkeiten und ihren qualitativen Inhalten können im Anhang eingesehen werden. Die prozentualen Anteile der Coding-Anzahlen setzen sich aus den absoluten Häufigkeiten der betreffenden Sub- bzw. Unterkategorien und ihren nächst höheren Oberkategorien zusammen.

12.3.1 Entwicklungen im Elaborationsverhalten durch die Interaktivität mit AR

Werden die Auswertungen der 80 Transkripte aus Prä- und Posttest mit KAT 1 betrachtet, so konnten über beide Gruppen hinweg 7213 Statements ermittelt werden. Dabei waren 3468 Aussagen auf die AR-Gruppe (AR) und 3745 Aussagen auf die HMD-AR-Gruppe (HMD-AR) zurückzuführen. Die AR-Gruppe nannte mit 1833 Kategorisierungen und einem Prozentanteil von 52 % mehr Aussagen im Prätest als im Posttest. In der HMD-AR-Gruppe konnten 2057 Statements codiert werden, von denen 55 % dem Prätest und 45 % dem Posttest entnommen wurden. Beide Vergleichsgruppen äußerten zu beiden Messzeitpunkten deutlich mehr Statements, die größtenteils Kategorie 3, gefolgt von Kategorie 1, zugewiesen wurden. Entsprechend änderte sich das Elaborationsverhalten beider Gruppen von Prä- auf Posttest so, dass nach dem Treatment mehr „verstehensorientiert“ und weniger „suchorientiert“ gearbeitet wurde. Dabei waren die prozentualen Unterschiede bei der AR-Gruppe höher als bei der HMD-AR-Gruppe (vgl. Tabelle A39 in Anhang A.3.3.3). Analog zu Kapitel 12.2.1 sollen die nach Stoff- und Teilchenebene aufgeschlüsselten Subkategorien einen tiefergehenden Einblick in die Verhaltens- und Denkmuster der Probanden beider Gruppen geben.

Hauptkategorie 1: Hinzufügen von Wissenselementen durch Abruf zugehörigen Wissens aus dem Gedächtnis

Nennung von Wissenselementen. Die Messung des Elaborationsverhaltens in Kategorie 1 ergab von Prä- auf Posttest, dass beide Vergleichsgruppen weniger Wissenselemente aus dem Gedächtnis abrufen und mehr nach Beziehungen suchen.

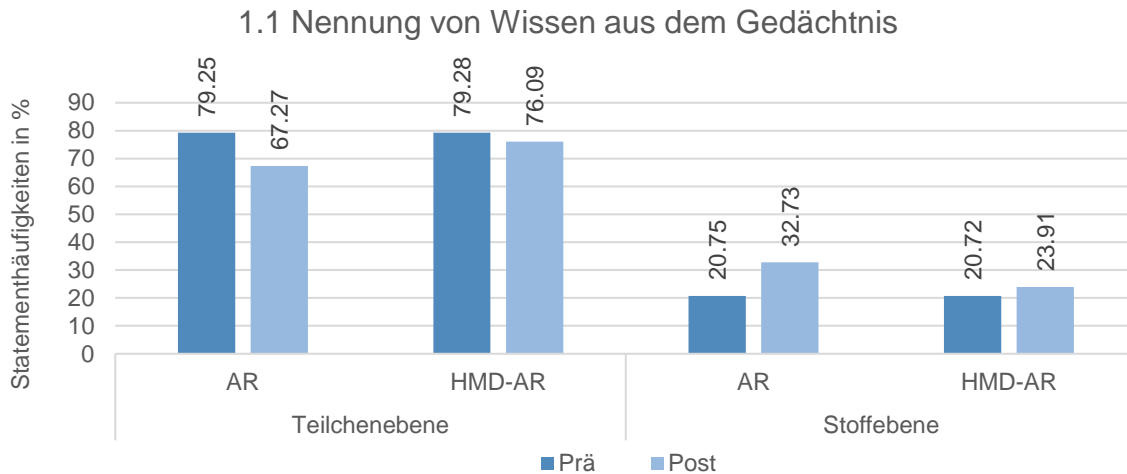


Abbildung 54. Übersicht der relativen Statementhäufigkeiten in Prozent aus KAT 1 der AR- und HMD-AR-Gruppe (AR und HMD-AR) zu Messzeitpunkt 1 und 2 für die Subkategorien von 1.1 *Nennung von Wissen aus dem Gedächtnis* mit ihrer Grundgesamtheit an Statements aus Prä- und Posttest ($N_{\text{Prä}} = 221$, $N_{\text{Post}} = 123$).

Die Subkategorien von 1.1 lassen von erstem auf zweiten Messzeitpunkt eine Verlagerung der Codierungen hinsichtlich Stoff- und Teilchenebene erkennen (vgl. Abbildung 55). Dabei wurden die Wissens Elemente mit einer Zunahme von 11.97 % bei der HMD-AR-Gruppe und von 3.19 % bei der AR-Gruppe vermehrt auf Stoffebene und weniger auf Teilchenebene abgerufen (vgl. Abbildung 55). Die qualitative Inhaltsanalyse demonstriert, dass sich die AR-Gruppe von Prä- auf Posttest gewissenhafter mit den Inhalten auf Teilchenebene auseinandersetzte, indem ausführlichere Definitionen und vermehrt Fachbegriffe genannt wurden. Bezüglich des Wissensabrufs auf Stoffebene, im Sinne von Versuchsbeschreibungen usw., wird ersichtlich, dass die HMD-AR-Gruppe im Posttest etwas stärker auf physikalische Eigenschaften einging. Die Subkategorien zum Wissensabruf aus der Lernumgebung decken konkrete Bezugnahmen zu den (M)ER aus dem Treatment auf, da die Probanden explizit die Darstellungen *Text*, *Symbol* und *Bild* nannten. Wesentliche Gruppenunterschiede konnten jedoch nicht gemessen werden.

Suche nach Beziehungen. Die Kategorisierungen zur Suche nach Beziehungen mit den Aufgabeninhalten verdeutlichen, dass die AR-Gruppe nach dem Treatment stärker als die HMD-AR-Gruppe mit der Stoffebene arbeitete. Entsprechend wird in Abbildung 56 die reduzierte bzw. erhöhte Kategorisierung an Statements in Subkategorie 1.2.1 *auf Teilchenebene* bzw. 1.2.2 *auf Stoffebene* in der AR-Gruppe ersichtlich. Die HMD-AR-Gruppe hingegen suchte von erstem auf zweiten Messzeitpunkt mit einer Zunahme von 15.68 % im Posttest vermehrt nach Beziehungen mit der Teilchenebene. Der Anstieg der Codings hinsichtlich der Beziehungssuche auf Stoffebene fiel mit 1.92 % bei der HMD-AR-Gruppe eher gering aus. Ein homogeneres Bild zeigt sich in den Subkategorien zur Suche nach Beziehungen mit dem Vorwissen. Von erstem auf zweiten Messzeitpunkt erhöhte sich in beiden Gruppen die Anzahl an Codings bezüglich der Teilchenebene und sank im Zusammenhang mit der Stoffebene.

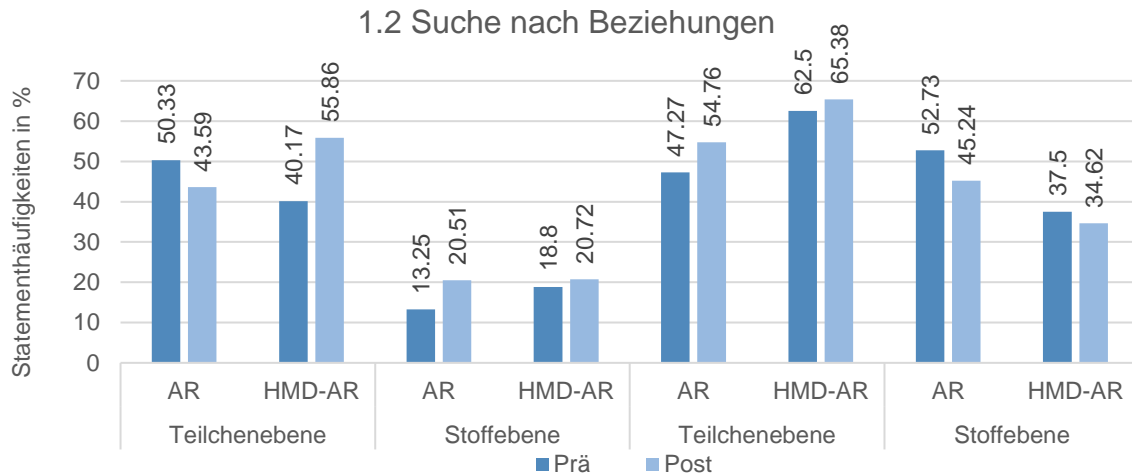


Abbildung 55. Übersicht der relativen Statementhäufigkeiten in Prozent aus KAT 1 der AR- und HMD-AR-Gruppe (AR und HMD-AR) zu Messzeitpunkt 1 und 2 für die Subkategorien von 1.2 *Suche nach Beziehungen* mit ihrer Grundgesamtheit an Statements aus Prä- und Posttest ($N_{\text{Prä}} = 268$, $N_{\text{Post}} = 228$).

Bei der Suche nach Beziehungen auf Teilchenebene im Prätest wurden aus inhaltlicher Perspektive keine Gruppenunterschiede gemessen. Analog zur AR-Gruppe fand sich zum ersten Messzeitpunkt des Öfteren eine dürftige Trennung von Stoff- und Teilchenebene, die auf Schwierigkeiten im Umgang mit der repräsentativen Ebene zurückzuführen war. Inadäquate Ausdrucksweisen fußen dabei auf dem falschen Gleichsetzen von Begrifflichkeiten, die dann zu einer Mischung von Stoff- und Teilchenebene führen (vgl. Ankerbeispiele der AR-Gruppe in Kapitel 12.2.1, z.B. Tabelle 61). Im Posttest achteten die Probanden der HMD-AR-Gruppe stärker auf die fachsprachliche Genauigkeit und nutzten Fachbegriffe bedachter zur Betonung von Stoff- und Teilchenebene. Die Codierungen aus den Subkategorien zur Suche nach Beziehungen mit dem Vorwissen untermauern dieses Ergebnis. Die qualitative Inhaltsanalyse des Posttests deckt zudem auf, dass insbesondere die Fokussierung auf Symbole den dezierten Umgang mit den Ebenen begünstigt.

Tabelle 92. Prä-Post-Vergleich mit ausgewählten Ankerbeispielen von Proband 44 der HMD-AR-Gruppe aus Subkategorie 1.2.3.2 *Suche nach Beziehungen mit dem Vorwissen auf Teilchenebene*.

Ausgewählte Ankerbeispiele von Proband 44 der HMD-AR-Gruppe

Prätest

„[...] Und dann würde mein **Chromion**, würden dann drei Elektronen aufnehmen, sodass ich **Chrom** habe [...]“

(Aufgabe 3)

Posttest

„Und mein **Sulfat**, da bin ich mir nicht sicher, ob das wirklich so zerfällt. **Zwei Elektronen** ab. Was ist dann von der **Ladung**?“

(Aufgabe 4)

Die Tendenz der positiven Entwicklung wird in Tabelle 92 exemplarisch an Versuchsperson 44 der HMD-AR-Gruppe beschrieben. Von Prä- auf Posttest verbesserte sich die fachsprachliche Genauigkeit ein Stück weit. Entsprechend zeigt das Ankerbeispiel im Prätest, dass die Suche mittels Nutzung von Text und Symbol auf Teilchenebene beim Aufstellen einer Reakti-

ongleichung auf einer uneinheitlichen Ausdrucksweise fußte (z.B. fehlende Begriffe der Teilchenebene wie „Atom“). Stattdessen reflektierte Proband 44 im Posttest die chemischen Inhalte intensiver, indem er bei der Auseinandersetzung mit der Wertigkeit des Sulfations sprachliche Ungenauigkeiten vermied und etwas gezielter auf Teilchenebene reflektierte. Die Beziehungssuche auf Stoffebene bestätigt zwar, dass es für die Probanden beider Vergleichsgruppen im Prätest herausfordernd war mit Stoff- und Teilchenebene differenziert umzugehen. Jedoch zeigt die HMD-AR-Gruppe, anders als die AR-Gruppe (vgl. Kapitel 12.2.1), von ersten auf zweiten Messzeitpunkt keine positiven Veränderungen des Elaborationsverhaltens.

Hauptkategorie 3: Hinzufügen von Wissen durch Wissenserzeugung mittels Inferenzen

Die Häufigkeitsanalysen der Subkategorien von 3.1 zum „oberflächlichen Verstehen“ (vgl. Schmalhofer, 1996) demonstrieren, dass nach dem Treatment in beiden Gruppen weniger paraphrasiert und inhaltlich bewertet wurde. Obwohl sich bei der HMD-AR-Gruppe insgesamt eine geringere Anzahl an Statements in 3.1 zuordnen ließ, zeigt die Häufigkeitsanalyse, dass die Versuchspersonen nach der Arbeit mit der High-End-Technologie, im Vergleich zur Tablet-Gruppe, in größerem Ausmaß Lösungswege beschrieben. Wohingegen die AR-Gruppe nach Elaboration der Lernumgebung mehr Zweifel anstellte, wurde in der HMD-AR-Gruppe ein Rückgang derartiger Statements festgestellt (vgl. Tabelle A41 in A.3.3.3). Die Ergebnisse der Unterkategorie 3.2 zum „tiefen Verstehen“ (Schmalhofer, 1996) offenbart in beiden Gruppen eine Zunahme an Codings. Demnach wurde in der HMD-AR-Gruppe mit einem prozentualen Anstieg von 10.92 % mehr geschlussfolgert. Ferner nannten die Probanden der HMD-AR-Gruppe im Posttest mit einem Rückgang von 49.18 % weniger Ergebnisse und diagnostizierten mit einer Abnahme von 11.48 % in geringerem Ausmaß eigene Elaborationsfehler. In der AR-Gruppe wurden zwar nach dem Treatment auch mehr Schlussfolgerungen sowie Fehlerdiagnosen angestellt, jedoch in wesentlich geringerem Ausmaß (vgl. Tabelle A42 in A.3.3.3).

Paraphrasieren und Herstellen von Beziehungen. Anders als bei der AR-Gruppe, deren Kodierungen zum „oberflächlichen Lernen“ (Schmalhofer, 1996) eine starke Zentralisierung auf die Stoffebene nach sich zogen, liefert die Häufigkeitsanalyse der Subkategorien von 3.1 der HMD-AR-Gruppe kaum Elaborationsveränderungen. Obgleich beide Vergleichsgruppen vermehrt Beziehungen zwischen den Ebenen herstellten, waren die quantitativen Unterschiede von Prä- auf Posttest hinsichtlich des Umgangs mit der Stoff- und Teilchenebene bei der HMD-AR-Gruppe äußerst gering (vgl. Abbildung 57).

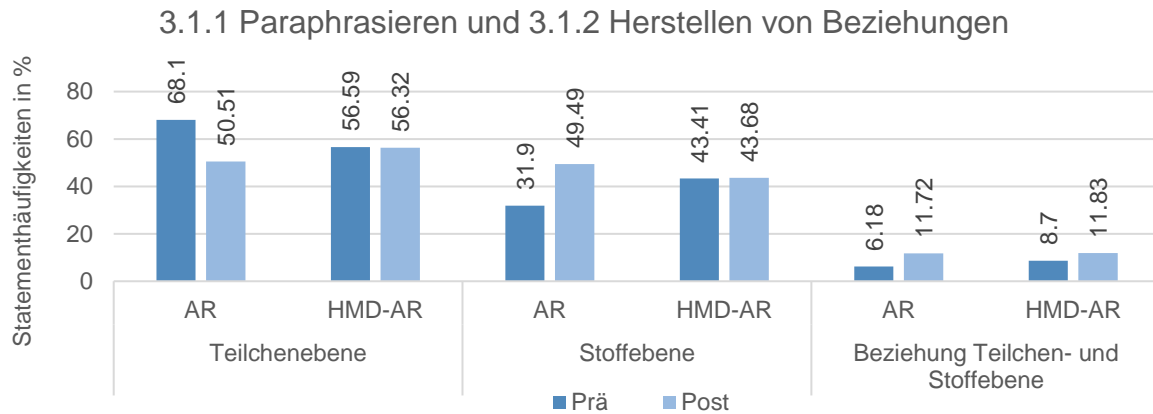


Abbildung 56. Übersicht der relativen Statementhäufigkeiten in Prozent aus KAT 1 der AR- und HMD-AR-Gruppe (AR und HMD-AR) zu Messzeitpunkt 1 und 2 für die Subkategorien von 3.1.1 *Paraphrasieren* und 3.1.2 *Herstellen von Beziehungen* mit ihrer Grundgesamtheit an Statements aus Prä- und Posttest (3.1.1: $N_{Prä} = 245$, $N_{Post} = 186$ und 3.1.2: $N_{Prä} = 156$, $N_{Post} = 213$).

Die qualitative Untersuchung der Paraphrasierungen auf Teilchenebene der HMD-AR-Gruppe liefert zu Messzeitpunkt 1 ein ähnliches Bild wie bei der AR-Gruppe. Entsprechend konnten die Schwierigkeiten im Umgang mit Stoff- und Teilchenebene auch in dieser Vergleichsgruppe bestätigt werden. Jedoch scheint sich das HMD-AR-Treatment nur bedingt positiv auf das Elaborationsverhalten ausgewirkt zu haben. Die Qualität der Statements des Posttests lässt noch immer zu wünschen übrig, da die Stoffebene vermehrt nebulös in die Paraphrasierungen auf Teilchenebene eingebunden wurden. Die Paraphrasierungen auf Stoffebene stützen sich in beiden Gruppen größtenteils auf Verbindungsnamen und eher selten auf Stoffeigenschaften wie Farbe oder Verformbarkeit. Ähnlich wie bei der AR-Gruppe (vgl. Kapitel 12.2.1) zeigt sich bei der HMD-AR-Gruppe im Prätest ein heterogenes Bild, da einerseits viele Codierungen mit unklarer Stoff-Teilchen-Ebentrennung gefunden wurden, die beispielsweise Elementsymbole oder Partikelformeln willkürlich mit Aspekten der Stoffebene vermengen (vgl. Proband 50 in Tabelle 93). Andererseits wurden einige Statements mit klarer Schwerpunktsetzung auf die Stoffebene ermittelt, wie zum Beispiel bei Proband 46, welcher sich mit Begriffen wie „Säure“ oder „Wasser“ gezielt auf Stoffebene bewegte.

Tabelle 93. Ausgewählte Ankerbeispiele von Proband 50 und Proband 46 der HMD-AR-Gruppe zur Demonstration missglückter und erfolgreicher Ebenentrennungen aus Subkategorie 3.1.1.2 *Paraphrasierungen auf Stoffebene*.

Ausgewählte Ankerbeispiele des Prätests von der HMD-AR-Gruppe

Missglückte Ebenentrennung

„[...] Wenn man jetzt das Ganze auf der **Stoffebene** anschaut, das Bleioxid, die **Verbindung Bleioxid**, die dann zum **metallisch glänzenden Blei** wird und das **Pb²⁺**, also eben zu **Pb** [...] Kohlenstoffdioxid, das ist **gasförmig**, wird gebildet.“

Erfolgreiche Ebenentrennung

„Das heißt auf der **Stoffebene** reagiert einfach unsere **Base** mit der **Säure** zu einem **Salz** und **Wasser**.“

(Aufgabe 2; Proband 46)

(Aufgabe 4; Proband 50)

Im Posttest ließ sich in der Grundgesamtheit der HMD-AR-Gruppe eine intensivere Auseinandersetzung mit der chemischen Fachsprache diagnostizieren, wodurch bewusstere Stoff-Teilchen-Ebenenwechsel angeregt wurden. Entsprechend erfolgten Reaktionsbeschreibungen auf einem höheren sprachlichen Niveau, das Begriffe der Stoffebene wie Metall bedachter in die Aussagen einbindet. Tabelle 94 beschreibt, dass Proband 54 mittels der Summenformel von Kohlenstoffdioxid konsequent auf Stoffebene paraphrasiert.

Tabelle 94. Ausgewähltes Ankerbeispiel des Posttests von Proband 54 der HMD-AR-Gruppe aus Subkategorie 3.1.1.2 *Paraphrasierung von Repräsentationsform auf Stoffebene.*

Ausgewähltes Ankerbeispiel

Posttest

„Da wird dann aus dem Salz wieder das elementare Metall. Und das *CO₂ als Gas* wird also Salz plus Kohlenstoff wird zu Metall.“

(Aufgabe 4; Proband 54 der HMD-AR-Gruppe)

Diese positive Verhaltensentwicklung zeigt sich folglich in beiden Gruppen. Ähnlich wie bei der AR-Gruppe fußen auch die Aussagen zum Herstellen von Beziehungen auf Ebenenwechseln, beispielsweise ausgehend von Verbindungsnamen auf Stoffebene in symbolische Erklärungen auf Teilchenebene, die oftmals nur bedingt glückten. Auch die Inhaltsanalyse der Transkripte der HMD-AR-Gruppe bestätigt, dass die Super-Lupe ein charakteristisches Mittel für den gelungenen Ebenenwechsel ist (vgl. Tabelle 95), jedoch selten zum Einsatz kam.

Tabelle 95. Ausgewähltes Ankerbeispiel des Prätests von Proband 42 der HMD-AR-Gruppe aus Subkategorie 3.1.2 *Herstellen von Beziehungen zwischen Stoff- und Teilchenebene.*

Ausgewähltes Ankerbeispiel

Prätest

„Also auf der *Stoffebene mit der Chromsulfatlösung*. Und wenn wir jetzt mit der *Superlupe* rangehen, sehen wir eben *in dieser Lösung die Wasserteilchen*, die wir jetzt nicht genau thematisieren. Aber eben *Chrom drei plus Kationen und die Sulfat-Anionen*.“

(Aufgabe 2; Proband 42 der HMD-AR-Gruppe)

Anders als bei der AR-Gruppe, deutet das Datenmaterial darauf hin, dass im Posttest in dieser Kategorie bedachter mit den Fachbegriffen umgegangen wurde (vgl. Kapitel 12.2.1). Entsprechend wurden vermehrt Bezüge zwischen Text und Symbol in Hinblick auf Stoff- und Teilchenebene hergestellt, welche die Wechsel positiv beeinflussen (vgl. Tabelle 96 mit Text = Farbe des Kohls und Symbol = Protonierung der Strukturformel).

Tabelle 96. Ausgewähltes Ankerbeispiel des Posttests von Proband 45 der HMD-AR-Gruppe aus Subkategorie 3.1.2 *Herstellen von Beziehungen zwischen Stoff- und Teilchenebene*.

Ausgewähltes Ankerbeispiel

Posttest

„Also auf jeden Fall müsste da das *Proton aufgenommen* worden sein und *auf Stoffebene* erscheint dieser ganze *Stoff rötlich*.“

(Aufgabe 2; Proband 45 der HMD-AR-Gruppe)

Lösungswege beschreiben. Bei der Beschreibung der Lösungswege mittels Teilchenebene weist das Datenmaterial bei der HMD-AR-Gruppe einen ähnlichen, aber weniger stark ausgeprägten, Trend wie bei der AR-Gruppe auf. Anders als bei der AR-Gruppe deuten die Ergebnisse darauf hin, dass die HMD-AR-Gruppe nach dem Treatment Lösungswege weniger auf Stoffebene beschrieb.

3.1.3 Lösungswege beschreiben

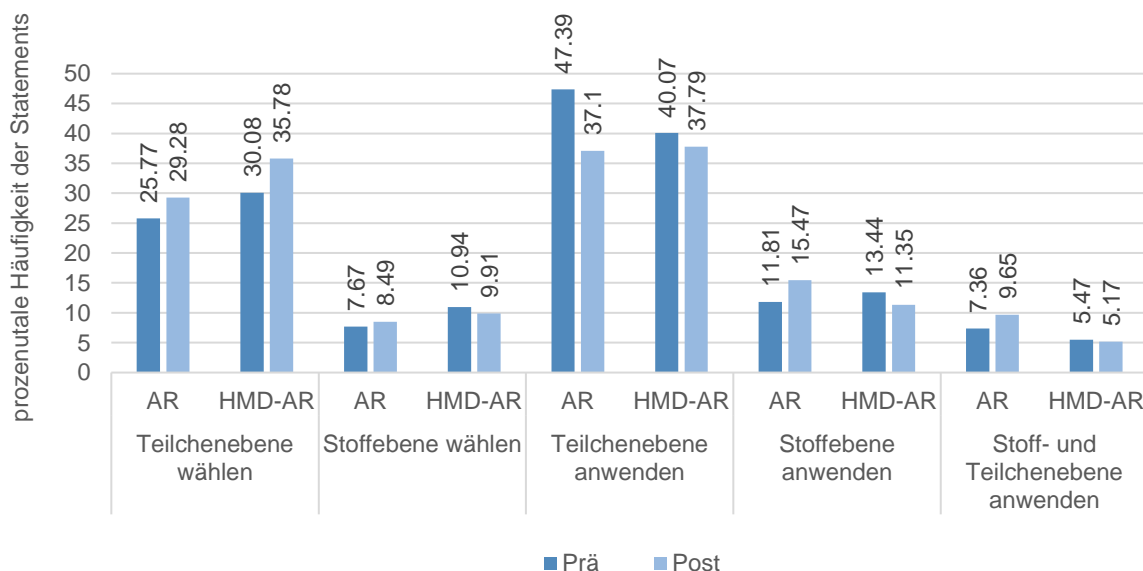


Abbildung 57. Übersicht der relativen Statementhäufigkeiten in Prozent aus KAT 1 der AR- und HMD-AR-Gruppe (AR und HMD-AR) zu Messzeitpunkt 1 und 2 für die Subkategorien von 3.1.3 *Lösungswege beschreiben* mit ihrer Grundgesamtheit an Statements aus Prä- und Posttest ($N_{\text{Prä}} = 1493$, $N_{\text{Post}} = 1297$).

Aus inhaltlicher Perspektive beinhalten die Statements aus Subkategorie 3.1.3.1 *Teilchenebene wählen* bei der HMD-AR-Gruppe vor allem Erklärungen der Teilchenebene und häufige Wechsel in die Stoffebene. Analog zur AR-Gruppe waren diese im Prätest insbesondere dann fehlerbehaftet oder von sprachlicher Ungenauigkeit, wenn die Probanden sehr vertieft in ihre Elaboration waren (z.B. beim Aufstellen von Reaktionsgleichungen). Im Posttest scheint sich das Verhalten der HMD-AR-Gruppe auf repräsentativer Ebene verändert zu haben, da Fachbegriffe zur Explikation der Stoff- und Teilchenebene präziser gewählt wurden. Insgesamt deutet das Datenmaterial von Messzeitpunkt 1 auf 2, veranlasst durch den Umgang mit (M)ER, auf einen leichten qualitativen Anstieg der Statements hin (vgl. Tabelle 97).

Tabelle 97. Ausgewähltes Ankerbeispiel des Posttests von Proband 41 der HMD-AR-Gruppe aus Subkategorie 3.1.3.2 *Lösungswege beschreiben: Teilchenebene wählen*.

Ausgewähltes Ankerbeispiel

Posttest

„Da wir hier zwei davon haben, haben wir zweimal minus zwei. Das Teilchen ist insgesamt ungeladen, PbO_2 , somit muss die Oxidationsstufe von dem Pb-Teilchen, also von dem Blei-Teilchen plus vier betragen [...].“

(Aufgabe 2; Proband 41 der HMD-AR-Gruppe)

Die Kategorisierungen von Subkategorie 3.1.3.2 *Stoffebene wählen* der HMD-AR-Gruppe stehen im Einklang mit den Ergebnissen der AR-Gruppe aus Kapitel 12.2.1. Erwähnenswert ist, dass die HMD-AR-Gruppe im Posttest vor allem durch die Wahl gezielter ER auf Stoffebene, konkreter auf die Reduktion bzw. Oxidation der Teilchen eingegangen ist, jedoch spezifische Erklärungen zur Stoff- bzw. Teilchenebene noch immer vernachlässigt wurden. Demnach scheint sich in der HMD-AR-Gruppe, anders als bei der AR-Gruppe, vorrangig der Umgang mit der repräsentativen Ebene verbessert zu haben. Die Statements aus Subkategorie 3.1.3.3 *Teilchenebene anwenden* der HMD-AR-Gruppe waren im Prätest vergleichbar mit jenen der AR-Gruppe (vgl. Kapitel 12.2.1). Die Codings bestätigen, dass ein angemessenes fachsprachliches Niveau mit Konkretisierungen von Koeffizienten, Ionen usw. einen zielbewussteren Umgang von Stoff- und Teilchenebene nach sich zog. Überdies zeigt das Datenmaterial, dass die HMD-AR-Gruppe im Prätest zur Betonung geladener Teilchen häufig auf den Begriff „Ion“ zurückgriff, jedoch Atome in ihrem Grundzustand nicht explizit auf Teilchenebene betitelte und Begriffe der submikroskopischen Ebene wie „Teilchen“ ignorierte. Nach dem Treatment stellte die HMD-AR-Gruppe, analog zur AR-Gruppe, häufiger Bezüge zur Teilchenebene her, jedoch war die sprachliche Ausdrucksweise ausbaufähig. Sie sollte stärker das Ziel verfolgen, die Teilchenebene zu explizieren. Die qualitative Inhaltsanalyse des Datenmaterials der Subkategorien 3.1.3.4 *Stoffebene anwenden* und 3.1.3.5 *Stoff- und Teilchenebene anwenden* der HMD-AR-Gruppe bekräftigen die bei der AR-Gruppe gemessenen Ergebnisse hinsichtlich der Lösungswegebeschreibung zu Messzeitpunkt 1 und 2. Das Ankerbeispiel von Proband 41 in Tabelle 98 macht deutlich, dass die Galvanisierung zum ersten Messzeitpunkt auf Teilchenebene (z.B. Beschreibungen zur Elektronenbewegung) durch undifferenzierte Einbindung der stofflichen Welt (z.B. Versuchsskizze mit Eisennagel) erklärt und der Wechsel nicht bewusst vollzogen wurde. Hingegen wurde im Posttest die Fachsprache mit ihren Begrifflichkeiten wie „Atom“ zur Explikation der Teilchenebene stärker fokussiert. Entsprechend deuten die Ergebnisse darauf hin, dass etwas gezielter zwischen den Ebenen übersetzt und ihre Trennung besser vollzogen wurde (vgl. Tabelle 98).

Tabelle 98. Prä-Post-Vergleich mit ausgewählten Ankerbeispielen von Proband 41 der HMD-AR-Gruppe aus Subkategorie 3.1.3.4 *Stoffebene anwenden*.

Ausgewählte Ankerbeispiele von Proband 41 der HMD-AR-Gruppe	
Prätest	Posttest
„Dann muss ich noch <i>einzeichnen</i> [...] die <i>Elektronen vorhanden</i> sind und eine Spannung angelegt wird. Und dann würde ich den Gang, also die <i>Wanderung der Chrom drei plus Teilchen</i> zeigen, dass die entlang wandern und sich dann <i>auf dem Eisennagel abscheiden</i> .“	„Das würde ich auch so <i>einzeichnen</i> und sich dann als <i>Chrom-Atom anlagern</i> , also als <i>elementares Chrom</i> . Genau. (12 Sek.) Okay. Ich glaube, ich würde auch noch die <i>Wanderung der Elektronen</i> einzeichnen. So.“
(Aufgabe 3)	(Aufgabe 4)

Inhaltliche Bewertungen. Wenn es um die inhaltlichen Bewertungen geht, werden in beiden Gruppen ähnliche Verhaltensweisen ersichtlich, da im Posttest, verglichen mit dem Prätest, weniger die Teilchenebene und mehr die Stoffebene sowie ihre Wechsel ineinander fokussiert wurden. Diese Tendenz kam jedoch in der AR-Gruppe sehr viel stärker als in der HMD-AR-Gruppe zum Vorschein (vgl. Tabelle A41 in Anhang A.3.3.3). Aus inhaltlicher Perspektive wird bei den Beurteilungen auf Teilchenebene der HMD-AR-Gruppe die zentrale Rolle der repräsentativen Ebene für das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis ersichtlich. Die qualitative Inhaltsanalyse der Subkategorie 3.3.4.3 *Inhaltliche Bewertung der Stoff-Teilchen-Ebenenwechsel* unterstreicht dieses Resultat (vgl. Tabelle 99).

Tabelle 99. Ausgewähltes Ankerbeispiel des Posttests von Proband 55 der HMD-AR-Gruppe aus Subkategorie 3.3.4.3 *Inhaltliche Bewertung der Stoff-Teilchen-Ebenenwechsel*.

Ausgewähltes Ankerbeispiel
Posttest „Also hier <i>vermischt man auch Textebene mit Symbolebene</i> , weil da auf einmal sozusagen, es sind immer die <i>Namen gegeben</i> . Also <i>Eisen, Kupferionen, Kupfer</i> , und so weiter. Und dann kommt auf einmal die <i>Symbolschreibweise, mit Eisenoxid, FeO</i> .“
(Aufgabe 5; Proband 55 der HMD-AR-Gruppe)

Schlussfolgerungen. Die Aufschlüsselungen von Kategorie 3.2 hinsichtlich Stoff- und Teilchenebene demonstrieren, dass sich das „tiefe Verstehen“ (nach Lind et al., 2004) in beiden Gruppen auf sehr ähnliche Art und Weise entwickelt hat. Entsprechend zeigen die Häufigkeitsanalysen zu Messzeitpunkt 1 und 2, dass die AR-Lernumgebung auf dem Tablet und vor allem auf der AR-Brille eine starke Verlagerung der Elaboration von Teilchen- in Richtung Stoffebene nach sich zog. Mit einer Coding-Zunahme von 20.63 % (vgl. AR-Gruppe: 6.06 %) schlussfolgerte die HMD-AR-Gruppe im Posttest stärker auf Stoffebene als im Prätest. Ferner wurde die Kombination aus beiden Ebenen zum zweiten Messzeitpunkt mehr genutzt (vgl. Abbildung 59).

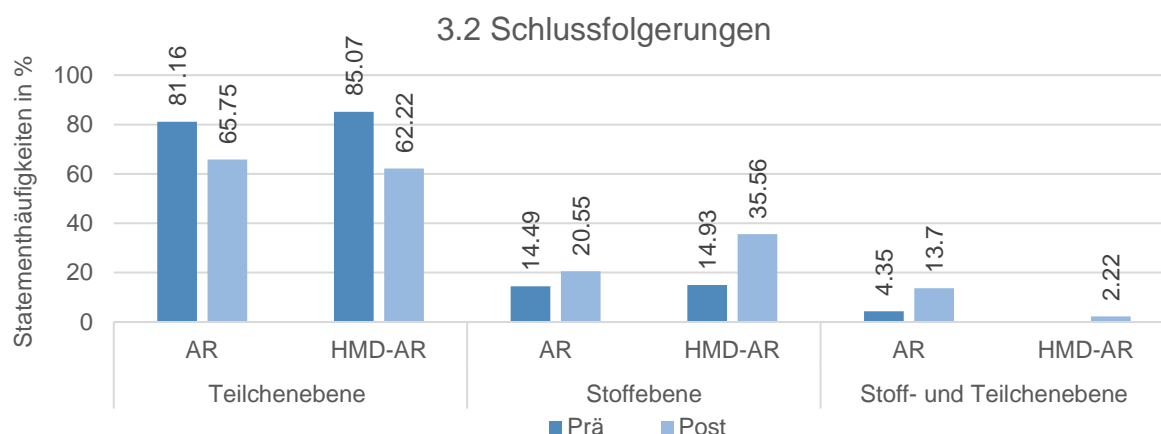


Abbildung 58. Übersicht der relativen Statementhäufigkeiten in Prozent aus KAT 1 der AR- und HMD-AR-Gruppe (AR und HMD-AR) zu Messzeitpunkt 1 und 2 für die Subkategorien von 3.2 *Schlussfolgerungen* mit ihrer Grundgesamtheit an Statements aus Prä- und Posttest ($N_{Prä} = 510$, $N_{Post} = 496$).

Der Gruppenvergleich weist aus inhaltlicher Perspektive in Kategorie 3.2.1.1 *Schlussfolgerungen auf Teilchenebene*, keine wesentlichen Unterschiede auf. Folglich scheinen sich die Schwierigkeiten im Umgang mit Stoff- und Teilchenebene von Prä- auf Posttest teilweise zu minimieren, da die Probanden etwas mehr auf die Terminologie und die exakte Ebenentrennung achteten. Der Prä-Post-Vergleich von Kategorie 3.2.1.2 *Schlussfolgerungen auf Stoffebene* untermauert diese Ergebnisse dahingehend, dass die HMD-AR-Gruppe gewissenhafter mit der repräsentativen Ebene umzugehen scheint, weil Begriffe der Stoffebene wie „Gas“ gezielter verwendet wurden. Dieses Resultat grenzt sich stark von der AR-Gruppe ab, da diese nach Bearbeitung der AR-Lernumgebung auf dem Tablet gewissenhafter auf Stoffebene durch eindeutige Explikation der Ebene (z.B. Begriffsnennung „Stoffebene“) schlussfolgerte (vgl. Kapitel 12.2.1).

Diagnosen eigener Fehler beim Elaborieren Die Häufigkeitsanalysen der HMD-AR-Gruppe von Messzeitpunkt 1 und 2 bestätigen die niedrigere Gewichtung der Teilchenebene und ihre gleichzeitige Zentrierung auf die Stoffebene (vgl. Tabelle A42 in Anhang A.3.3.3). Auffallend zeigt sich Subkategorie 3.2.5.1 *Diagnosen auf Teilchenebene*, da die zugehörigen Kodierungen von Fokussierungen auf die repräsentative Ebene geprägt sind. Dies steht im Einklang mit den in Kapitel 12.2.1 vorgestellten Resultaten der AR-Gruppe, die tendenziell eine positive Entwicklung hinsichtlich des Denkens in den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) erkennen lassen.

Ergebnis nennen. Auch die Codierungen von 3.2.2 demonstrieren, dass sich von Prä- auf Posttest, nicht nur in der AR-Gruppe, sondern auch in der HMD-AR-Gruppe eine positive Veränderung des Elaborationsverhaltens hinsichtlich des Umgangs mit Stoff- und Teilchenebene manifestierte.

Tabelle 100. Prä-Post-Vergleich mit ausgewählten Ankerbeispielen von Proband 42 der HMD-AR-Gruppe aus Subkategorie 3.2.2 *Ergebnis nennen*.

Ausgewählte Ankerbeispiele von Proband 42 der HMD-AR-Gruppe	
Prätest	Posttest
„Einmal haben wir <i>Bleioxid</i> , das zu <i>elementarem Blei reduziert</i> wird.“	„Und generell würde ich <i>in einer Ebene</i> versuchen, zu <i>bleiben</i> .“
(Aufgabe 4)	(Aufgabe 5)

Exemplarisch verdeutlicht Tabelle 100, dass die HMD-AR-Gruppe im Prätest unzureichend zwischen Stoff- und Teilchenebene trennte. Demnach vernachlässigte Proband 42 der HMD-AR-Gruppe in seiner Ergebnissenennung die Reduktion des Teilchens „Pb⁴⁺“ und kombinierte damit fälschlicherweise Prozesse der Teilchenebene mit einem undefinierten Verbindungsnamen, der prinzipiell der Stoffebene zugeordnet wurde (vgl. Tabelle 100). Hingegen wurde im Posttest insgesamt nicht nur verstärkt die korrekte Fachsprache fokussiert, sondern die Stoff-Teilchen-Ebenentrennung bewusst thematisiert (vgl. Tabelle 100).

Bemerkungen zum methodischen Vorgehen. Die Codierungen der HMD-AR-Gruppe beinhalten größtenteils Erklärungen zum Vorgehen beim Aufstellen von Reaktionsgleichungen unter Berücksichtigung von Aspekten wie „Oxidationsstufen bestimmen“ und unterstreichen damit die bisherigen Ergebnisse der AR-Gruppe. Nach dem Treatment wurden in beiden Gruppen weniger allgemeingültige Inhalte genannt und stärker MER fokussiert. Beispielsweise wurden Skizzen als depiktionale Darstellungen oder Symbolschreibweisen näher beschrieben und ihrer Bedeutsamkeit, insbesondere für Erklärungen auf Teilchenebene, hervorgehoben.

Hauptkategorie 4: Reduktion von Detailwissen durch Streichung

Die Codierungen von Hauptkategorie 4 der HMD-AR-Gruppe weichen von jenen der AR-Gruppe ab. Wohingegen die AR-Gruppe von Messzeitpunkt 1 auf 2 mehr Zieldefinitionen und weniger Detailreduktionen vornahm (vgl. Kapitel 12.2.1), zeigt sich in der HMD-AR-Gruppe ein Rückgang an Statements in 4.1 *Zieldefinitionen* und eine Coding-Zunahme in 4.2 *Schwerpunktsetzungen*. Die HMD-AR-Gruppe veränderte ihre Elaborationsverhalten hinsichtlich der Reduktion von Detailinformationen kaum (vgl. Tabelle A43 in Anhang A.3.3.3).

Zieldefinitionen. Die Aussagen von Kategorie 4.1 der HMD-AR-Gruppe waren im Prätest inhaltsgleich mit jenen der AR-Gruppe. Dabei lag den Zieldefinitionen auch die Fokussierung auf Stoff- und Teilchenebene als wesentlicher Aspekt bei der Aufgabenbearbeitung zugrunde. Im Posttest visierte die HMD-AR-Gruppe hinsichtlich des Denkens in den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) insbesondere die repräsentative Ebene an und grenzte sich damit im Prä-Post-Vergleich ein Stück weit von der AR-Gruppe ab (vgl. Tabelle 101).

Tabelle 101. Ausgewähltes Ankerbeispiel des Posttests von Proband 56 der HMD-AR-Gruppe aus Kategorie 4.1 Zieldefinitionen.

Ausgewähltes Ankerbeispiel

Posttest

„Der Test, ob man im *AR-Teil* das Zeug richtig durchgelesen hat und die *Fachsprache* schön übernehmen kann. Also. Wir wollen eine Redoxgleichung aufstellen.“

(Aufgabe 2; Proband 56 der HMD-AR-Gruppe)

Schwerpunktsetzungen. Die Häufigkeitsanalysen verweisen auf gleiche Trends in beiden Vergleichsgruppen. Entsprechend unterstreichen die Resultate der HMD-AR-Gruppe die in Kapitel 12.2.1 aufgeführten Ergebnisse der AR-Gruppe. Von Messzeitpunkt 1 auf 2 wurden vermehrt Schwerpunktsetzungen auf Stoffebene und weniger auf Teilchenebene getätigt. Ferner wurde der Stoff-Teilchen-Ebenenwechsel stärker fokussiert (vgl. Abbildung 60).

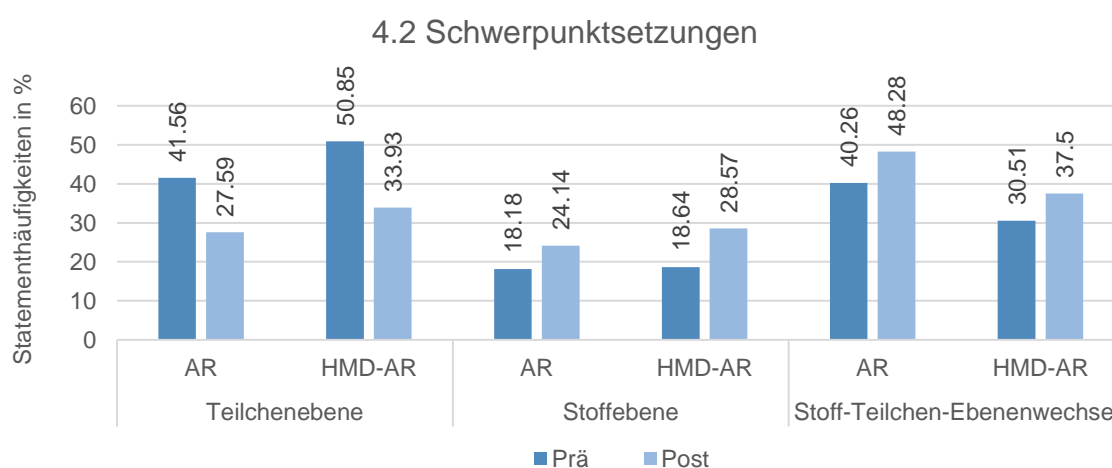


Abbildung 59. Übersicht der relativen Statementhäufigkeiten in Prozent aus KAT 1 der AR- und HMD-AR-Gruppe (AR und HMD-AR) zu Messzeitpunkt 1 und 2 für die Subkategorien von 4.2 *Schwerpunktsetzungen* mit ihrer Grundgesamtheit an Statements aus Prä- und Posttest ($N_{\text{Prä}} = 136$, $N_{\text{Post}} = 114$).

Die qualitative Inhaltsanalyse der Codierungen aus 4.2.1 *Schwerpunktsetzung Teilchenebene* der HMD-AR-Gruppe liefert zum ersten Messzeitpunkt ein gleiches Ergebnis wie bei der AR-Gruppe (vgl. Kapitel 12.2.1). Anders als bei der Vergleichsgruppe veränderte sich jedoch die Elaboration von Messzeitpunkt 1 auf 2 dahingehend, dass sich die Probanden im Zusammenhang mit der Schwerpunktsetzung stärker auf (M)ER und ihre chemischen Notationen wie Indizes oder Fachbegriffen wie „Atome“ konzentrierten (vgl. Tabelle 102).

Tabelle 102. Ausgewähltes Ankerbeispiel des Posttests von Proband 45 der HMD-AR-Gruppe aus Subkategorie 4.2.1 *Schwerpunktsetzung Teilchenebene*.

Ausgewähltes Ankerbeispiel

Posttest

„Das wäre das Bleioxid-*Teilchenverbund*.“

(Aufgabe 2; Proband 45 der HMD-AR-Gruppe)

Proband 45 macht ersichtlich, dass für ihn die gegebene Summenformel „PbO₂“ im Mittelpunkt stand und mit der Teilchenebene in Verbindung gesetzt wurde. Beide Vergleichsgruppen gingen von Prä- auf Posttest gewissenhafter mit den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) um, jedoch visierte die AR-Gruppe stärker das Teilchenmodell per se an und nannte in diesem Zusammenhang weniger Eigenschaften auf repräsentativer Ebene (vgl. Kapitel 12.2.1). In Hinblick auf die Schwerpunktsetzungen auf Stoffebene deuten die Ergebnisse darauf hin, dass die AR-Gruppe von Prä- auf Posttest dezidierter mit der Triplet-Beziehung als die HMD-AR-Gruppe umging. Qualitativ hochwertige Aussagen der HMD-AR-Gruppe stützten sich im Posttest vor allem auf der chemischen Fachsprache (vgl. Tabelle 103). Dabei setzten beide Gruppen im Posttest stärkere Schwerpunkte auf die Stoffebene, jedoch geschah dies bei der HMD-AR-Gruppe mehr implizit.

Tabelle 103. Prä-Post-Vergleich mit ausgewählten Ankerbeispielen von Proband 47 der HMD-AR-Gruppe aus Subkategorie 4.2.2 *Schwerpunktsetzung Stoffebene*.

Ausgewählte Ankerbeispiele von Proband 47 der HMD-AR-Gruppe	
Prätest	Posttest
„Auf der <i>Stoffebene</i> . Auf der <i>Stoffebene</i> .“	„Der <i>Text</i> , das bezieht sich dann ja auf die <i>Stoffebene</i> .“
(Aufgabe 2)	(Aufgabe 4)

Die Codings zu den Schwerpunktsetzungen hinsichtlich des Stoff-Teilchen-Ebenenwechsels bestätigen die bisherigen Ergebnisse, insbesondere, dass die chemische Fachsprache vor allem in der HMD-AR-Gruppe als starker Prädiktor für die Explikation der Ebenen angesehen werden kann.

Die Aussagen der HMD-AR-Gruppe aus Subkategorie 4.3.1 *Detailreduktion Teilchenebene* unterstreichen die Denkweise, dass häufig Verbindungsamen die Stoffebene und Symbol-schreibweisen die Teilchenebene beschreiben. Grundsätzlich wurde von der HMD-AR-Gruppe erkannt, dass stoffliche Eigenschaften wie Farben nicht simultan ohne expliziten Ebenenwechsel in Beschreibungen auf Teilchenebene wie der Notation von Reaktionsgleichungen eingebunden werden sollten. Summen- oder Partikelformeln auf Teilchenebene wurden von der HMD-AR-Gruppe oftmals sehr voreilig reduziert. Dabei schlossen sich selten ausführliche Erklärungen an. Obgleich sich die Anzahl der Codings von Prä- auf Posttest minimiert, ist deren qualitative Veränderung nur schwer nachvollziehbar. Die HMD-AR-Gruppe konzentrierte sich, teils mit richtiger und teils mit falscher Intention, auf die Reduktion von ER zur Betonung von Stoff- und Teilchenebene. Anders als bei der AR-Gruppe ließ sich jedoch keine direkte Verbesserung von Messzeitpunkt 1 auf 2 hinsichtlich des Denkens in den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) messen. Die Daten verweisen eher auf eine sichtlich dezidiertere Nutzung von (M)ER. Zur Verifizierung schlossen sich daher Untersuchungen zur chemischen Fachsprache mit KAT 2 an.

12.3.2 Einfluss der chemischen Fachsprache auf das Denken in den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000)

Die Ergebnisse aus Kapitel 12.3.1 weisen auf Veränderungen des Elaborationsverhaltens hinsichtlich des Denkens in den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) hin, die sich in den Gruppen teilweise unterschiedlich offenbaren. Die positive Verhaltensentwicklung von Prä- auf Posttest in der AR-Gruppe scheint auf der verstärkten Nutzung der Stoffebene zu fußen. Im Vergleich dazu decken die Ergebnisse bei der HMD-AR-Gruppe den Trend auf, dass diese dezidiert mit der repräsentativen Ebene und infolgedessen gewissenhafter mit der Triplet-Beziehung interagierte. Zur Klärung des Denkens in den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000; vgl. FF3₂ und FF4₂ in Kapitel 5.3) schließt sich daher, in analogem Vorgehen zu Kapitel 12.2, bei der Hälfte der Probanden von HMD-AR- und AR-Gruppe (N = 20) die zusätzliche Analyse des Datenmaterials mit KAT 2 an. Angesichts dessen wurden insgesamt 4175 Kategorisierungen von HMD-AR- und AR-Gruppe vorgenommen. Dabei sind 2121 Aussagen auf die 10 Probanden der AR-Gruppe mit 1106 Statements im Prätest und 1015 Statements im Posttest zurückzuführen. Die 10 Probanden der HMD-AR-Gruppe tätigten 2054 Äußerungen, von denen sich 1035 dem ersten und 1019 dem zweiten Messzeitpunkt zuordnen lassen. Die prozentualen Anteile in den Hauptkategorien von KAT 2 waren zu beiden Messzeitpunkten in den beiden Gruppen nahezu identisch. Nicht nur die AR-Gruppe, auch die HMD-AR-Gruppe bewegte sich im Posttest etwas weniger auf der Ebene des suchorientierten Lernens und elaborierte stattdessen mehr „verstehensorientiert“. Reduktionen von Detailwissen nahmen von Prä- auf Posttest in beiden Gruppen, aber eher in der AR-Gruppe, ab (vgl. Tabelle A44 in Anhang A.3.3.4). Nachstehend werden ausgewählte Subkategorien aus quantitativer und qualitativer Perspektive näher beleuchtet:

Hauptkategorie 1: Hinzufügen von Wissenselementen durch Abruf zugehörigen Wissens aus dem Gedächtnis

Nennung von Wissensinhalten und Suche nach Beziehungen. Die quantitative Analyse der Codierungen aus 1.1 *Nennung von Wissenselementen, die nicht in der gerade behandelten Aufgabe behandelt werden* demonstriert, dass das Elaborationsverhalten der AR-Gruppe mit einem prozentualen Anteil von 1.78 % etwas anstieg, wohingegen es sich bei der AR-Gruppe mit 7.33 % deutlich verringerte. Auffallend dabei war, dass die HMD-AR-Gruppe weniger auf das Wissen aus dem Langzeitgedächtnis zurückgriff und häufig Wissenselemente aus der Lernumgebung nannte (vgl. Tabelle A45 in Anhang A.3.3.4). Die Anzahl an Kategorisierungen zur Suche nach Beziehungen verringerte sich von Messzeitpunkt 1 auf 2 in beiden Gruppen mit ähnlichen Tendenzen (vgl. Abbildung 61).

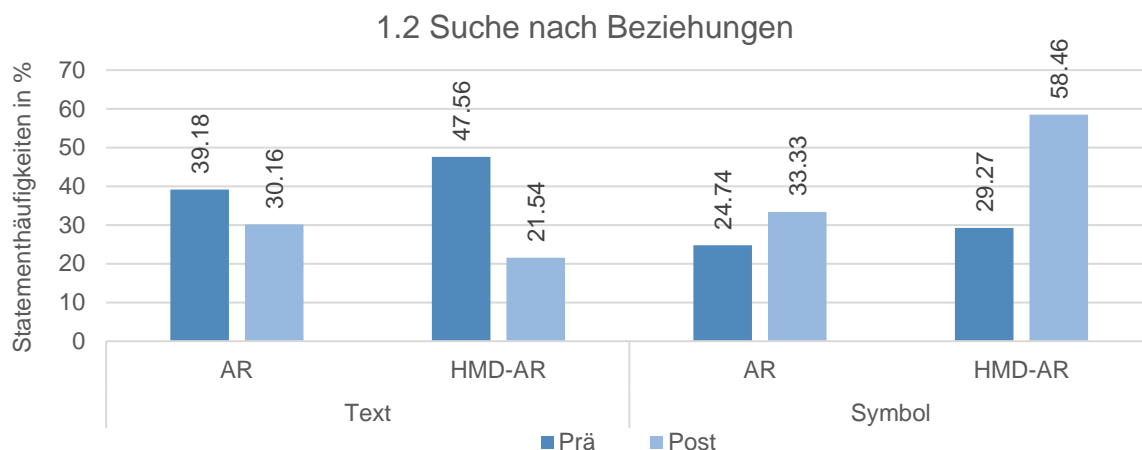


Abbildung 60. Übersicht der relativen Statementhäufigkeiten in Prozent aus KAT 2 der AR- und HMD-AR-Gruppe (AR und HMD-AR) zu Messzeitpunkt 1 und 2 für die Subkategorien von 1.2 *Suche nach Beziehungen* mit ihrer Grundgesamtheit an Statements aus Prä- und Posttest ($N_{\text{Prä}} = 179$, $N_{\text{Post}} = 128$).

Beide Gruppen suchten nach dem Treatment weniger mit dem Text und mehr mit dem Symbol nach Beziehungen, wobei sich diese Entwicklung deutlich ausgeprägter in der HMD-AR-Gruppe abzeichnete. Die qualitative Inhaltsanalyse der Subkategorien 1.2.1 zur Suche nach Beziehungen mit dem Text liefert bei der HMD-AR-Gruppe ein ähnliches Bild wie bei der AR-Gruppe. Im Prätest konzentrierte sich die Suche tendenziell mehr auf den Umgang mit Stoff- und Teilchenebene, wohingegen im Posttest prinzipiell eher fachinhaltliche Fragen, vor allem in Aufgabe 3 zu den Hochofenprozessen, gestellt wurden. Die Suche nach Beziehungen mit dem Symbol grenzt sich bei der HMD-AR-Gruppe dahingehend von der AR-Gruppe ab, dass weniger die Triplet-Beziehung, sondern tendenziell stärker die Teilchenebene als solche fokussiert wurde (vgl. Tabelle 104). Im Vergleich dazu legte die AR-Gruppe von Prä- auf Posttest einen größeren Fokus auf die fachliche Klärung.

Tabelle 104. Ausgewähltes Ankerbeispiel des Posttests von Proband 45 der HMD-AR-Gruppe aus Subkategorie 1.2.2 *Suche nach Beziehungen mit dem Symbol*.

Ausgewähltes Ankerbeispiel

Posttest

„Oh, ich habe mich gerade vertan, sehe ich, oder? Nein, das passt. Ich war mir nicht sicher, ob ich die *Oxidationszahl* richtig bestimmt habe, aber das müsste passen. Genau, *nimmt vier Elektronen auf*. Dabei *verringert sich die Oxidationszahl* und es entsteht ein *Blei-Atom*.“

(Aufgabe 4; Proband 45 der HMD-AR-Gruppe)

Hauptkategorie 3: Hinzufügen von Wissen durch Wissenserzeugung mittels Inferenzen

Paraphrasierungen. Werden die relativen Häufigkeiten von Subkategorie 3.1 *Paraphrasierungen* betrachtet, so zeigen sich in beiden Gruppen ähnliche Elaborationsentwicklungen (vgl. Abbildung 62).

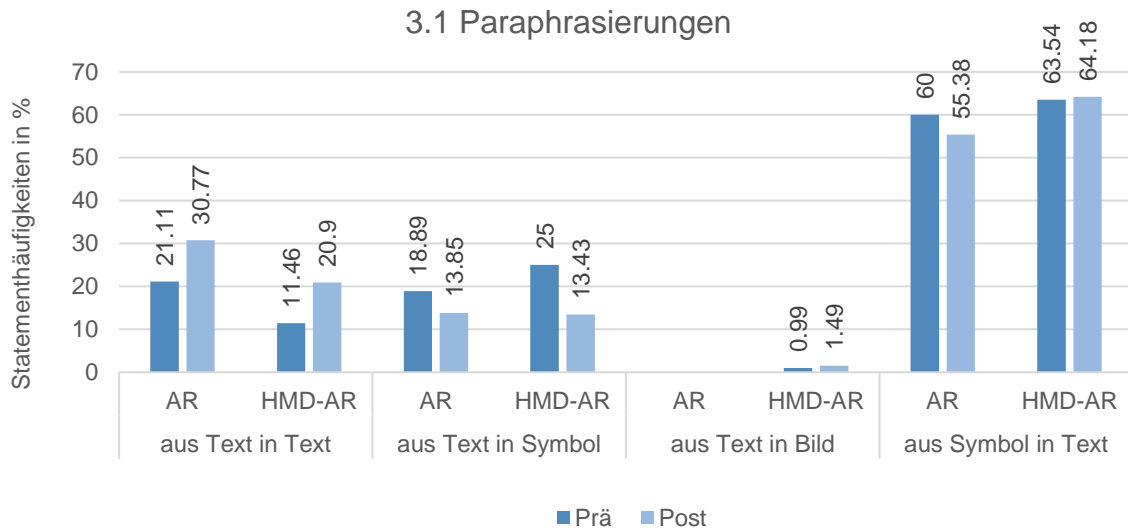


Abbildung 61. Übersicht der relativen Statementhäufigkeiten in Prozent aus KAT 2 der AR- und HMD-AR-Gruppe (AR und HMD-AR) zu Messzeitpunkt 1 und 2 für die Subkategorien von 3.1 *Paraphrasierungen* mit ihrer Grundgesamtheit an Statements aus Prä- und Posttest ($N_{Prä} = 1349$, $N_{Post} = 1379$).

Codierungen, die Paraphrasierungen von Text in Text beinhalten, wurden von ersten auf zweiten Messzeitpunkt in beiden Gruppen mit einer Zunahme von ca. 9 % häufiger getätigt, wohingegen die Übersetzungen von Text in Symbol mit ca. 5 % in der AR-Gruppe und ca. 12 % in der HMD-AR-Gruppe abnahmen. Translationen in Bild wurden allgemein kaum vorgenommen. Die AR-Gruppe übersetzte das Symbol von ersten auf zweiten Messzeitpunkt deutlich weniger in einen Text, wohingegen die HMD-AR-Gruppe dies sogar etwas häufiger tat (vgl. Abbildung 62). Insgesamt scheint in der HMD-AR-Gruppe vor allem dem Paraphrasieren in Text eine bedeutsame Rolle zuzukommen. Die qualitative Inhaltsanalyse von Kategorie 3.1.1.1 *aus Text in Text* liefert in beiden Vergleichsgruppen ein ähnliches Ergebnis, wobei sich die HMD-AR-Gruppe zu beiden Messzeitpunkten mehr auf der Stoffebene bewegte. Ihre Aussagen umfassen weniger Partikelformen mit ihren Teilchenprozessen, vielmehr zielen sie auf Verbindungsnamen und ihre stofflichen Eigenschaften ab. Stoff-Teilchen-Ebenenwechsel scheinen dabei außer Acht gelassen zu werden. Daher wird der Anschein erweckt, dass der Fokus in den Paraphrasierungen von 3.1.1.1 der HMD-AR-Gruppe, anders als bei der AR-Gruppe, nicht auf der Triplet-Beziehung, sondern auf der repräsentativen Ebene lag. Die qualitative Inhaltsanalyse von Kategorie 3.1.1.4 *aus Symbol in Text* demonstriert, analog zur AR-Gruppe, eine intensivere Auseinandersetzung mit Stoff- und Teilchenebene. Die Probanden beider Gruppen stellten im Prätest zielbewusste Bezüge zu den Ebenen her, die teilweise von Ungenauigkeiten geprägt waren. Im Posttest verbesserte sich die Qualität der Statements, da präzisere Formulierungen ersichtlich und die Ebenen differenzierter betrachtet wurden.

Herstellen von Beziehungen. Subkategorie 3.1.2 offenbart von Prä- auf Posttest in beiden Gruppen eine Coding-Zunahme, wobei die AR-Gruppe mit einer Zunahme von 3.72 % mehr Beziehungen zwischen den ER als die HMD-AR-Gruppe mit 1.92 % herstellte (vgl. Tabelle A46 in Anhang A.3.3.4). Werden die Aussagen bezüglich ihrer Inhaltsqualität untersucht, so werden keine Gruppenunterschiede ersichtlich. (M)ER wurden auf Stoff- und Teilchenebene genutzt, wobei der gezielte Ebenenwechsel sehr häufig in beiden Gruppen missglückte (vgl. Tabelle 105).

Tabelle 105. Ausgewähltes Ankerbeispiel des Prätests von Proband 46 der HMD-AR-Gruppe aus Subkategorie 3.1.2 *Herstellen von Beziehungen zwischen Text und Symbol*.

Ausgewähltes Ankerbeispiel

Prätest

„Und es entsteht ja nicht nur das *giftige Gas*, sondern eben auch *vier Sauerstoff-Ionen*. Das heißt da fehlt auf jeden Fall der zweite Teil. Vier O^2 fehlt.“

(Aufgabe 5; Proband 46 der HMD-AR-Gruppe)

Im Posttest wurden die Ebenenwechsel zwar deutlich öfter forciert, jedoch ohne sichtliche Verbesserung. Stattdessen versuchte die HMD-AR-Gruppe nach dem Treatment die Ebenen strikt unabhängig voneinander zu betrachten. Dabei erlangten die Aussagen, aufgrund sprachlicher Feinheiten wie der adäquaten Nutzung von Begriffen der Teilchenebene (vgl. Tabelle 106), nach Bearbeitung der HMD-AR-Lernumgebung ein höheres sprachliches Niveau.

Tabelle 106. Ausgewähltes Ankerbeispiel des Posttests von Proband 44 der HMD-AR-Gruppe aus Subkategorie 3.1.2 *Herstellen von Beziehungen zwischen Text und Symbol*.

Ausgewähltes Ankerbeispiel

Posttest

„da kommt es zur *Abspaltung von den Protonen* aus dem *Molekül*. Das heißt, die *molekulare Struktur* ändert sich.“

(Aufgabe 1; Proband 44 der HMD-AR-Gruppe)

Lösungswege beschreiben. Die quantitativen Veränderungen von Messzeitpunkt 1 auf 2 bezüglich des Beschreibens der Lösungswege waren in der HMD-AR-Gruppe mit 3.13 % etwas größer als in der AR-Gruppe mit nur 0.24 % (vgl. Tabelle A46 in Anhang A.3.3.4). Abbildung 63 macht ersichtlich, dass beide Gruppen mit sehr ähnlichen prozentualen Veränderungsraten weniger den Text und mehr das Symbol sowie die Kombination aus beiden verwendeten. Dies gilt insbesondere für die Anwendung von Texten, wohingegen die Subkategorien von 3.1.3 zur Anwendung von Symbol oder MER ein heterogenes Bild liefern. Entsprechend wandte die HMD-AR-Gruppe weniger das Symbol per se oder die Kombination aus allen drei ER an, sondern stützte sich in ihren Beschreibungen stärker auf MER, die sich aus Text und Symbol bzw. gegebenenfalls Bild zusammensetzten (vgl. Abbildung 63).

3.1.3 Lösungswege beschreiben

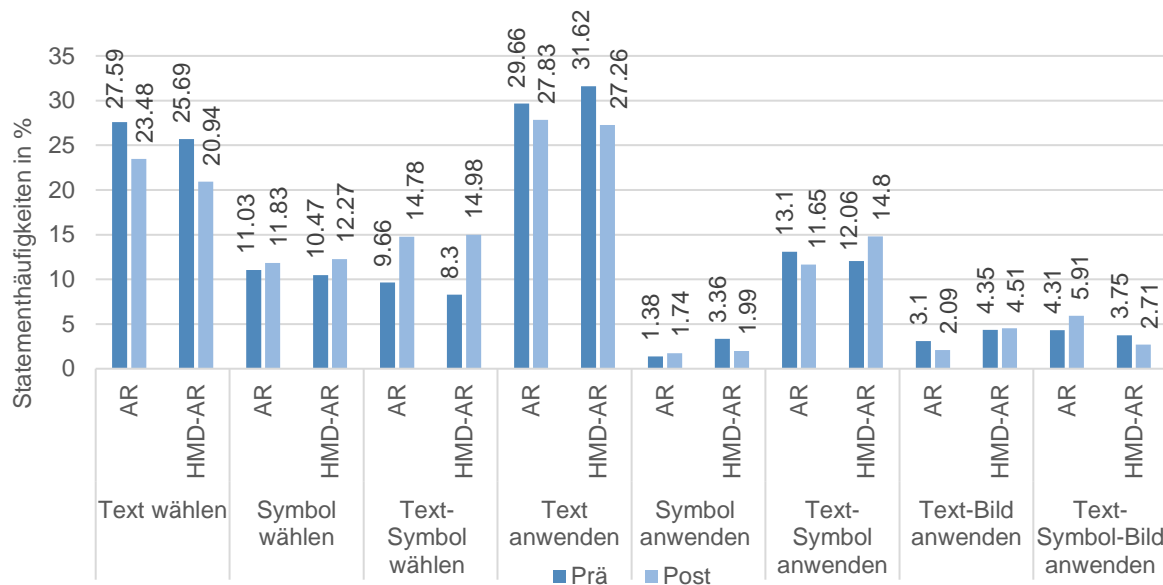


Abbildung 62. Übersicht der relativen Statementhäufigkeiten in Prozent aus KAT 2 der AR- und HMD-AR-Gruppe (AR und HMD-AR) zu Messzeitpunkt 1 und 2 für die Subkategorien von 3.1.3 *Lösungswege beschreiben* mit ihrer Grundgesamtheit an Statements aus Prä- und Posttest ($N_{\text{Prä}} = 1086$, $N_{\text{Post}} = 1129$).

Insgesamt zeigt die Häufigkeitsanalyse der HMD-AR-Gruppe auf, dass diese nach dem Treatment weniger ER wählten sowie anwendeten und sich eher auf die Kombination aus zwei ER fokussierten. Bei der AR-Gruppe wird eine Dezentralisierung hinsichtlich des Textes ersichtlich. Die qualitative Inhaltsanalyse deckt auf, dass sich die HMD-AR-Gruppe, ähnlich wie die AR-Gruppe, den Texten zur Differenzierung von Stoff- und Teilchenebene bediente. Sowohl aus fachlicher Perspektive als auch in Hinblick auf das Denken in den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) unterstreichen die Codierungen der HMD-AR-Gruppe die Resultate von Kategorie 3.1.3.1 der AR-Gruppe aus Kapitel 12.2.2. Von Prä- auf Posttest steigerte sich in dieser Kategorie auch bei der HMD-AR-Gruppe, aufgrund der sprachlichen Präzision, die Qualität der Aussagen. Im Prätest wurde mehr auf Stoff- oder Teilchenebene elaboriert, wohingegen im Posttest auch die Wechsel eine wesentliche Rolle spielten (vgl. Tabelle 107). In dem Ankerbeispiel aus Tabelle 107 bewegt sich Proband 43 auf Stoffebene, integriert jedoch auf Basis der gewählten Texte „Natrium“ oder „Synthese“ Symbole der Teilchenebene unbedacht in seine Schilderungen. Im Posttest dagegen wandte die Versuchsperson eine strikte Ebenentrennung an, die ausgehend von Elektronenübergängen auf Teilchenebene gezielt durch die Wahl des Textes „Überzug“ zur Stoffebene wechselt.

Tabelle 107. Prä-Post-Vergleich mit ausgewählten Ankerbeispielen von Proband 43 der HMD-AR-Gruppe aus Subkategorie 3.1.3.1 *Lösungswege beschreiben: Text wählen.*

Ausgewählte Ankerbeispiele von Proband 43 der HMD-AR-Gruppe	
<p>Prätest</p> <p>„[...] Natriumklotz [...] paar <i>Dampfwolken</i>, in <i>Anführungsstrichen</i> anzudeuten, <i>Cl₂</i>, schreibe die <i>Symbole</i> darüber. Und <i>Reaktionspfeil</i>, da mache ich einmal hier so einen <i>Haufen</i> und schreibe da <i>NaCl</i> darüber. Dann hätte man sozusagen erst einmal die <i>Symbolsprache</i>, dann quasi die <i>Stoffebene</i> und jetzt <i>Reaktionsgleichung</i>.“</p> <p>(Aufgabe 1)</p>	<p>Posttest</p> <p>„Also dann auf der Kathode beim negativ geladenen Pol, da kommen die Elektronen sozusagen an. Das ist ein Elektronendruck, so. Und da wird am Eisen Chrom abgeschieden, also <i>Chrom(III+)</i> nimmt drei <i>Elektronen</i> auf und wird zu Chrom. Was man auf der <i>Stoffebene</i> eben als <i>Überzug</i> sehen kann.“</p> <p>(Aufgabe 4)</p>

Die Aussagen von 3.1.3.2 der HMD-AR-Gruppe demonstrieren, dass die Versuchspersonen bei der Wahl von Symbolen vor allem auf Teilchenebene dachten. Anders als bei der AR-Gruppe wird jedoch in den Codierungen der HMD-AR-Gruppe von Prä- auf Posttest nur bedingt eine bessere Inhaltsqualität ersichtlich. Zwar gingen beide Gruppen in den Aussagen des Posttests gewissenhafter mit den Begrifflichkeiten der Teilchenebene wie „Atom“ oder „Molekül“ um, jedoch blieb bei der HMD-AR-Gruppe der Ebenenwechsel sehr oft unberücksichtigt. Kategorie 3.1.3.4 *Text anwenden* demonstriert marginale Gruppenunterschiede. In beiden Gruppen veränderte sich das Elaborationsverhalten so, dass im Prätest tendenziell eher die Triplet-Beziehung und im Posttest die fachliche Klärung im Vordergrund stand (s. auch Kapitel 12.2.2). Dabei ist aber zu erwähnen, dass sich die HMD-AR-Gruppe auch noch zum zweiten Messzeitpunkt stark auf die chemische Fachsprache konzentrierte und mittels Analyse der (M)ER zwischen Stoff- und Teilchenebene zu differenzieren versuchte (vgl. Tabelle 108).

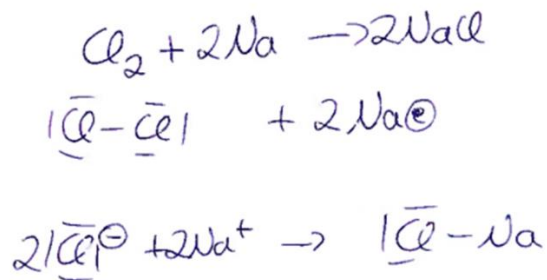
Tabelle 108. Ausgewähltes Ankerbeispiel des Posttests von Proband 41 der HMD-AR-Gruppe aus Subkategorie 3.1.3.4 *Lösungswege beschreiben: Text anwenden.*

<p>Ausgewähltes Ankerbeispiel</p> <p>Posttest</p> <p>„Zunächst werden hier schon wieder <i>Stoff- und Teilchenebene vermischt</i>, weil ja <i>Kupferoxid und Eisen</i> in dem Fall eher als-, oder <i>werden zur Stoffebene gezählt</i> und diese <i>roten Kupferkügelchen</i> werden ja <i>zur Teilchenebene</i>-, also beziehungsweise <i>rot</i> geht auch nicht, weil <i>rot</i> ist, die <i>Farbe</i> ist nur <i>auf Stoffebene</i> zu <i>beobachten</i> [...].“</p> <p>(Aufgabe 5; Proband 41 der HMD-AR-Gruppe)</p>

Auch die Statements von Subkategorie 3.1.3.8 *Text und Symbol*, die sich überwiegend der Teilchenebene zuordnen lassen, verdeutlichen die Schwierigkeiten im gezielten Umgang innerhalb einer Ebene. Abbildung 64 verdeutlicht dies exemplarisch an der Testbearbeitung von Proband 46 der HMD-AR-Gruppe, der sich zwar in seinen Notationen und verbalen Äußerungen strikt auf Teilchenebene bewegte, jedoch Probleme bei der korrekten Symboldarstellung

des Salz-Teilchens „Natriumchlorid“ hatte. Er nutzte fälschlicherweise die Valenzstrichschreibweise, anstatt die Kristallstruktur im Teilchenverbund zu skizzieren. Auch in Hinblick auf die Teilchenanzahlen unterstreicht die Notation eine geringe Qualität, da im letzten Schritt die Koeffizienten vernachlässigt wurden.

Anwendung von Text und Symbol (Lösung von Proband 46)



Aufgabe 1 des Prättests

Abbildung 63. Testbearbeitung von Proband 46 der HMD-AR-Gruppe am Beispiel von Aufgabe 1 des Prättests aus Subkategorie 3.1.3.8 *Lösungswege beschreiben: Text und Symbol anwenden*.

Ferner finden sich in dieser Kategorie zahlreiche Codierungen, die vermehrt stoffliche Eigenschaften in die Aussagen auf Teilchenebene integrieren. Die Ergebnisse bestätigen, dass die HMD-AR-Gruppe, anders als die AR-Gruppe, weniger Stoff-Teilchen-Ebenenwechsel intendierte und tendenziell eher die Ebenen voneinander abzugrenzen versuchte.

Tabelle 109. Ausgewähltes Ankerbeispiel des Prättests von Proband 41 der HMD-AR-Gruppe aus Subkategorie 3.1.3.8 *Lösungswege beschreiben: Text und Symbol anwenden*.

Ausgewähltes Ankerbeispiel

Prättest

„Das heißt, man kann jetzt hier schon mal von Sauerstoff bei minus zwei ausgehen. Jetzt haben wir zwei *Sauerstoffteilchen in der Formel* [...] Da es sich hier um *einen ungeladenen Stoff* handelt, also wir sind jetzt gerade auf der *Stoffebene oder nein, machen wir es anders, nicht auf der Stoffebene*, sondern da es sich um ein *ungeladenes Teilchen* handelt, dann sind wir auf der *Teilchenebene* [...]“

(Aufgabe 2; Proband 41 der HMD-AR-Gruppe)

Das Ankerbeispiel in Tabelle 109 beschreibt, dass Proband 41 beim Aufstellen der Redoxreaktion eine starke Verbindung zwischen submikroskopischer und repräsentativer Ebene herstellt, indem er die Teilchen als Symbol betrachtet. Dabei scheint ihm die angestrebte Differenzierung von Stoff- und Teilchenebene schwerzufallen. Das Datenmaterial deutet in beiden Gruppen auf eine Verbesserung des Elaborationsverhaltens von ersten auf zweiten Messzeitpunkt hin. Wohingegen in der AR-Gruppe im Posttest tendenziell dezidiert Stoff-Teilchen-Ebenenwechsel durchgeführt wurden, scheint die HMD-AR-Gruppe mittels Anwendung von

Text und Symbol gewissenhafter in der jeweiligen Ebene, vor allem auf Teilchenebene, zu elaborieren (vgl. Abbildung 65).

Anwendung von Text und Symbol (Lösung von Proband 43)

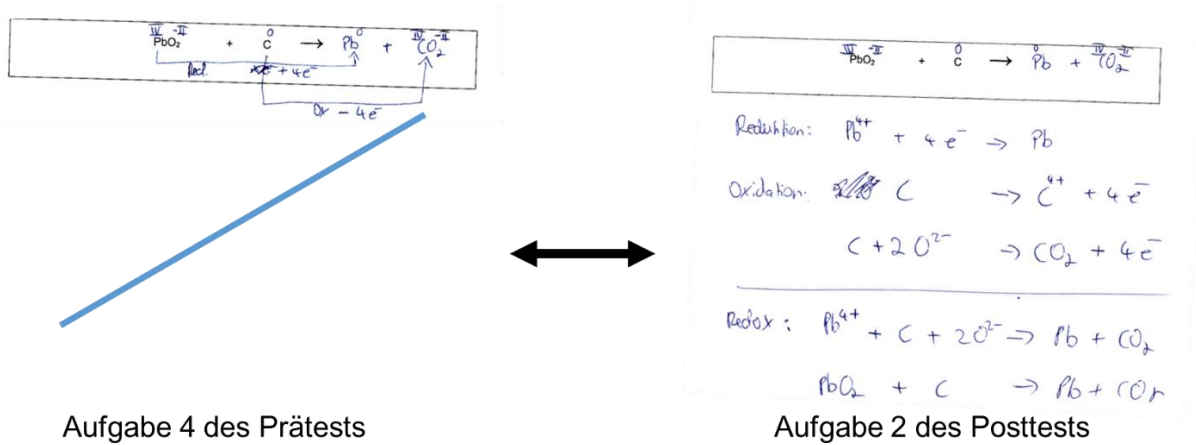


Abbildung 64. Prä-Post-Vergleich der Testbearbeitung von Proband 43 der HMD-AR-Gruppe am Beispiel der Ankeraufgabe zur Gewinnung von Blei aus Subkategorie 3.1.3.8 *Lösungswege beschreiben: Text und Symbol anwenden*.

Abbildung 65 veranschaulicht, dass Proband 43 die Elektronenübergänge zum ersten Messzeitpunkt nur andeutet und die zugehörigen Prozesse verbalisiert, wohingegen bereits die Verschriftlichungen im Posttest auf eine gewissenhaftere Auseinandersetzung mit der Teilchenebene verweisen. Entsprechend bestätigt das Datenmaterial den Trend, dass die HMD-AR-Gruppe nach dem Treatment bedachter mit der repräsentativen und submikroskopischen Ebene umging, wohingegen die AR-Gruppe mehr in allen drei Ebenen dachte. Die qualitative Inhaltsanalyse von Kategorie 3.1.3.10 *Text, Symbol und Bild anwenden* demonstriert in der AR-Gruppe die Tendenz einer Verbesserung hinsichtlich des Denkens in den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000; vgl. Kapitel 12.2.2).

Anwendung von Text, Symbol und Bild (Lösung von Proband 52)

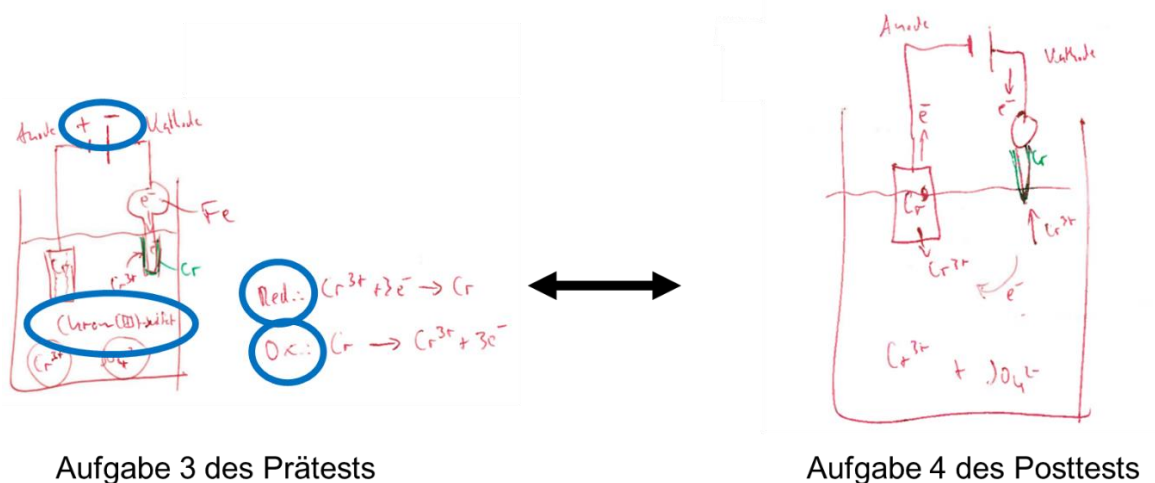


Abbildung 65. Prä-Post-Vergleich der Testbearbeitung von Proband 52 am Beispiel der Ankeraufgabe zur Galvanisierung aus Subkategorie 3.1.3.10 *Lösungswege beschreiben: Text, Symbol und Bild anwenden*.

Dieser Effekt wurde jedoch in den Aussagen der HMD-AR-Gruppe nicht diagnostiziert. Die HMD-AR-Gruppe differenzierte weder in Prä- noch in Posttest ausreichend zwischen Stoff- und Teilchenebene, vielmehr bewegten sie sich sprunghaft zwischen diesen und vernachlässigten konkrete Erklärungen zum Stoff-Teilchen-Ebenenwechsel. Das Ankerbeispiel von Proband 52 (vgl. Markierungen in Abbildung 66) demonstriert exemplarisch, dass bei der HMD-AR-Gruppe keine Veränderungen von Prä- auf Posttest registriert wurden. Die Versuchsperson kombinierte Text, Symbol und Bild ohne Stoff- und Teilchenebene voneinander abzugrenzen (z.B. mit einer Super-Lupe). Dabei wurden zudem Textinhalte weggelassen. Es gilt anzumerken, dass diese Schwierigkeiten vor allem in Aufgabe 4 des Posttests zur Galvanisierung deutlich wurden. Auch Proband 47 grenzte die Ebenen unzureichend voneinander ab, da er stark die bildliche Darstellung des Versuchsaufbaus fokussierte (vgl. Tabelle 110).

Tabelle 110. Ausgewähltes Ankerbeispiel des Prätests von Proband 47 der HMD-AR-Gruppe aus Subkategorie 3.1.3.10 *Lösungswege beschreiben: Text, Symbol und Bild anwenden*.

Ausgewähltes Ankerbeispiel

Posttest

„Oh, jetzt kommt diese *Bildsprache*. Der *Text*. So, *Bildsprache*. Jetzt muss ich diesen-. Jetzt male ich diesen *Aufbau* nochmal. Und jetzt male ich dort *Ionen* hinein. Also einmal schreibe ich *Fe* und dann einmal *Cr*. Dann *Cr³⁺* und dann mache ich so Pfeilchen, die dann zu der Elektrode führen. Und von der gehen 3 plus so bla, bla. Okay. Ja. Und die *bildhafte Darstellung*, da muss ich jetzt so Pünktchen malen [...] *Cr, Fe, Cr³⁺*.“

(Aufgabe 4; Proband 47 der HMD-AR-Gruppe)

Schlussfolgerungen und Diagnosen eigener Fehler. Die Kodierungen von KAT 2 hinsichtlich des „tiefen Verstehens“ (vgl. Lind et al., 2004) nahmen nicht nur in der AR-Gruppe, sondern auch in der HMD-AR-Gruppe ab. In nahezu identischem Ausmaß mit einer prozentualen Differenz von ca. 11 % schlussfolgerten die beiden Gruppen unter Verwendung der gegebenen (M)ER weniger und diagnostizierten häufiger ihre eigenen Fehler.

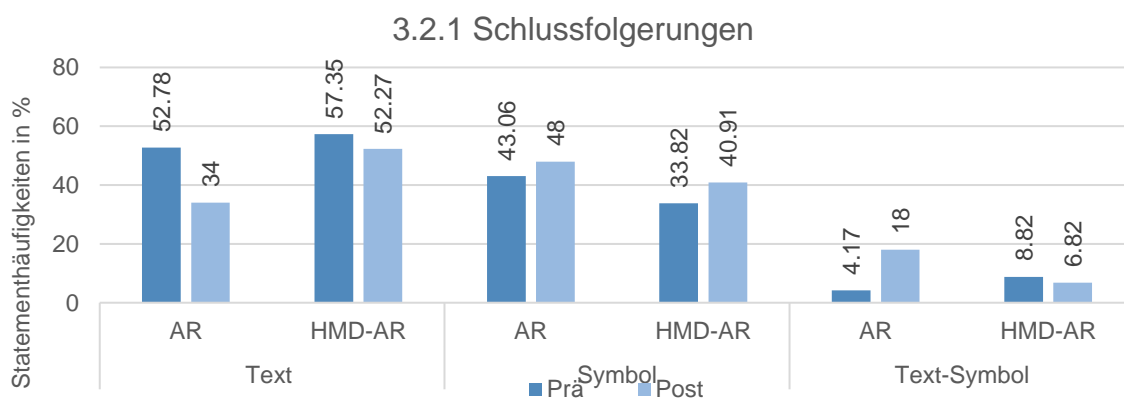


Abbildung 66. Übersicht der relativen Statementhäufigkeiten in Prozent aus KAT 2 der AR- und HMD-AR-Gruppe (AR und HMD-AR) zu Messzeitpunkt 1 und 2 für die Subkategorien von 3.2.1 *Schlussfolgerungen* mit ihrer Grundgesamtheit an Statements aus Prä- und Posttest ($N_{\text{Prä}} = 140$, $N_{\text{Post}} = 94$).

Entsprechend demonstriert Abbildung 67 exemplarisch an Kategorie 3.2.1, dass beide Vergleichsgruppen weniger mit Texten und mehr mit Symbolen schlussfolgerten bzw. Diagnosen eigener Fehler anstellten (vgl. Abbildung 67). Ferner wurde für Diagnosen in beiden Gruppen verstärkt auf die Kombination aus Text und Symbol zurückgegriffen (vgl. Tabelle A47 in Anhang A.3.3.4). Schlussfolgerungen mittels MER wurden nur in der AR-Gruppe häufiger im Posttest getätigt (vgl. Abbildung 67). Wohingegen sich beim Schlussfolgern stärkere Verhaltensveränderungen in der AR-Gruppe aufzeigen, scheint die HMD-AR-Lernumgebung auf der AR-Brille die HMD-AR-Gruppe in Hinblick auf das Diagnostizieren stärker beeinflusst zu haben. Die qualitative Inhaltsanalyse der Subkategorien 3.2.1 bestätigt von Prä- auf Posttest in beiden Gruppen eine Verbesserung des Elaborationsverhaltens hinsichtlich des Denkens in den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000). Dabei wird erneut deutlich, dass die HMD-AR-Gruppe Ebenenwechsel in geringerem Ausmaß anstrebte.

Tabelle 111. Prä-Post-Vergleich mit ausgewählten Ankerbeispielen von Proband 41 der HMD-AR-Gruppe aus Subkategorie 3.2.1.1 *Schlussfolgern mit Text*.

Ausgewählte Ankerbeispiele von Proband 41 der HMD-AR-Gruppe	
Prätest	Posttest
„Das heißt, in dem Fall, wenn die Elektronen abgegeben werden, erhöht sich die Oxidationsstufe .“	„weil es ja keine Kügelchen sind. Wenn dann müsste man schon konkret sagen, ob es sich um Atome , Ionen , Moleküle und so weiter handelt.“
(Aufgabe 3)	(Aufgabe 5)

Das Ankerbeispiel von Proband 41 in Tabelle 111 demonstriert exemplarisch für die HMD-AR-Gruppe, dass im Prätest mit dem Text auf Teilchenebene geschlussfolgert wurde, die Ebene jedoch nicht eindeutig beschrieben und erklärt wurde. Daher ist unklar, welches Teilchen seine Oxidationsstufe erhöht und ob sich der Proband bewusst auf die Teilchenebene konzentrierte. Wird eine Aussage des Posttests begutachtet, so kommt die sprachliche Präzision mittels Fachbegriffen wie „Atome“, „Ionen“ usw. zum Vorschein (vgl. Tabelle 111). Entsprechend setzte er die Bedeutung der repräsentativen Ebene in Relation zur Teilchenebene. Die qualitative Inhaltsanalyse der Statements aus Kategorie 3.2.1.2 zur Stoffebene zeigt in Anlehnung an Kapitel 12.2.2, dass sich das Denken in den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) von ersten auf zweiten Messzeitpunkt in beiden Vergleichsgruppen tendenziell verbessert hat. Dabei scheint vor allem die HMD-AR-Gruppe zielbewusster mit der repräsentativen Ebene umzugehen, da diese die Bedeutsamkeit der (M)ER durch ihre explizite Nennung stärker betonen. Die Codierungen von Kategorie 3.2.1.3 untermauern dieses Resultat.

Die Subkategorien hinsichtlich des Diagnostizierens weisen zwar nur wenige Codierungen auf, veranschaulichen aber aus inhaltlicher Perspektive den Umgang mit der repräsentativen Ebene. Analog zur AR-Gruppe wurden von der HMD-AR-Gruppe Fehlerdiagnosen mittels

(M)ER angestellt, um nicht nur fachlich, sondern auch hinsichtlich der Verwendung von Stoff- und Teilchenebene, adäquater zu elaborieren. Das Ankerbeispiel in Tabelle 112 verdeutlicht, dass Proband 47 mittels einem Symbol „CO₂“ vorherige Aussagen zu den Beobachtungen auf Stoffebene revidierte. Entsprechend bestätigt auch diese Kategorie die Zentralisierung der HMD-AR-Gruppe auf eine Ebene, Stoff- oder Teilchenebene.

Tabelle 112. Ausgewähltes Ankerbeispiel des Posttests von Proband 47 der HMD-AR-Gruppe aus Subkategorie 3.2.1.3.2 *Diagnose eigener Fehler mittels Symbol*.

Ausgewähltes Ankerbeispiel

Posttest

„Doch, es wird *sichtbar*, weil ja *CO₂-Gas* entsteht.“

(Aufgabe 3 Proband 47 der HMD-AR-Gruppe)

Hauptkategorie 4: Reduktion von Detailwissen durch Streichung

Schwerpunktsetzungen und Detailreduktionen. Nach Sichtung des Datenmaterials von Kategorie 4 stellte sich heraus, dass die Probanden beider Gruppen von ersten auf zweiten Messzeitpunkt mit rund 12 % mehr Schwerpunktsetzungen und mit Werten > 13.9 % weniger Detailreduktionen vornahmen. Die Schwerpunktsetzungen beider Gruppen untermauern die bisherigen Ergebnisse, dass der Text eher in den Hintergrund und das Symbol sowie die Kombination aus beiden in das Zentrum der Elaboration rückte (s. Tabelle A48 in Anhang A.3.3.4). Dabei deckt die qualitative Inhaltsanalyse der Kategorien 4.2.2 *Schwerpunktsetzung Symbol* und 4.2.3 *Schwerpunktsetzung Text und Symbol* erneut auf, dass sich die HMD-AR-Gruppe im Posttest intensiver mit der repräsentativen Ebene auseinandersetzte. Überdies beschrieb die HMD-AR-Gruppe ihr Vorgehen in Hinblick auf die ER-Wahl und –Anwendung im Posttest deutlicher als im Prätest. Dies wird beispielhaft an einer Aussage von Proband 43 (vgl. Tabelle 113) demonstriert, der sich auf die einheitliche Ausdrucksweise durch Kombination von Partikelform und Fachbegriff zur Beschreibung der Reduktion konzentrierte. Diese bewusste Auseinandersetzung mit den (M)ER wurde in den Statements der AR-Gruppe seltener diagnostiziert.

Tabelle 113. Ausgewähltes Ankerbeispiel des Posttests von Proband 43 der HMD-AR-Gruppe aus Subkategorie 4.2.3 *Schwerpunktsetzung Text und Symbol*.

Ausgewähltes Ankerbeispiel

Posttest

„aber hier wären, ja, hier *Stoffsprache* sozusagen und *Symbolsprache* vermischt. Also es gibt *verschiedene Benennungen*. Da würde ich doch eher einheitlich sagen: *Reduktion von Kupfer-Ionen*. Und dann vielleicht auch sagen: *Cu²⁺* und der *Oxidation von festem Eisen, Fe oder festem Eisenatom* sogar, nein, *festem Eisen* ist besser, entsteht elementares *Kuper, Cu*, und *Eisenoxid FeO*, könnte man machen.“

(Aufgabe 5 Proband 43 der HMD-AR-Gruppe)

12.3.3 Zusammenfassung der Ergebnisse zur Untersuchung der Wirkung der Interaktivität von AR auf das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis (KAT 1 und KAT 2)

Werden die Ergebnisse der Kapitel 12.3.1 und 12.3.2 betrachtet, so zeigt sich in beiden Vergleichsgruppen, die mit der jeweiligen AR-Lernumgebung auf dem Tablet bzw. der AR-Brille gearbeitet haben, von ersten auf zweiten Messzeitpunkt ein verändertes Elaborationsverhalten. Die Ergebnisse der HMD-AR-Gruppe stehen teilweise im Einklang mit jenen der AR-Gruppe, wobei die klassische AR-Lernumgebung auf dem Tablet insgesamt größere Verhaltensveränderungen in Hinblick auf das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis nach sich zog. Obgleich die Häufigkeits- und Inhaltsanalysen konstatieren, dass beide Gruppen zum zweiten Messzeitpunkt zielbewusster mit Stoff- bzw. Teilchenebene umgingen, scheint AR im Tablet-Format positivere Effekte zu erzielen. Die Analysen decken auf, dass die Versuchspersonen der AR-Gruppe nach Bearbeitung der AR-Lernumgebung mit dem Tablet dezidierter in den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) dachten. Vor allem der gewissenhaftere Umgang mit der Stoffebene kann als wesentliches Resultat festgehalten werden, wodurch vielversprechende Ebenenwechsel angeregt wurden (vgl. Kapitel 12.3.1). Die Ergebnisse der HMD-AR-Gruppe liefern ein heterogeneres Bild. Auch wenn sich in manchen Kategorisierungen der HMD-AR-Gruppe, wie jenen zum Schlussfolgern, ähnliche Entwicklungen wie bei der AR-Gruppe messen ließen, so wurden dennoch Gruppenunterschiede identifiziert. Zwar wurde auch in der HMD-AR-Gruppe im Posttest eine Verbesserung des Stoff-Teilchen-Konzeptverständnisses registriert, jedoch fußte diese weniger auf dem Ebenenwechsel per se. Es zeigten sich nach der Arbeit mit dem HMD-AR-Setting geringere Verhaltensänderungen bezogen auf die Triplet-Beziehung. Stattdessen konzentrierten sich die Probanden vor und auch noch nach dem Treatment eher auf eine der beiden Ebenen, wobei dies im Posttest etwas bewusster geschah. Überdies konnte auch in der HMD-AR-Gruppe der Trend aufgedeckt werden, dass die Stoffebene stärker fokussiert wurde. Es gilt aber zu betonen, dass sich die AR-Gruppe wesentlich intensiver auf die Stoffebene konzentrierte und folglich insgesamt adäquater in den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) dachte. Die Ergebnisse aus Kapitel 12.3.2 zur Wirksamkeit von AR bestätigen in diesem Zusammenhang die Bedeutsamkeit der chemischen Fachsprache für das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis. Entsprechend wurde bei der AR-Gruppe ersichtlich, dass der adäquate Umgang mit (M)ER in Hinblick auf die gezielte Einbindung von Fachbegriffen wie „Anionen“ die Explikation von Stoff- oder/und Teilchenebene unterstützt (vgl. Kapitel 12.2.2 und 12.3.2). Auch die Aussagen der HMD-AR-Gruppe untermauern dieses Resultat. Dabei rückte von ersten auf zweiten Messzeitpunkt durchweg die Repräsentationsform „Text“ in den Hintergrund, wohingegen Symbole sowie MER an Bedeutung gewonnen haben und stärker für die Elaborationen genutzt wurden. Überdies stellten beide Gruppen im Posttest verstärkt Beziehungen zwischen den ER her. Dabei wurde deutlich, dass

die HMD-AR-Gruppe, im Vergleich zur AR-Gruppe, weitaus zielbewusster mit der repräsentativen Ebene als solche umging, aber die Brücke zur makroskopischen und/oder submikroskopischen Ebene nicht immer (korrekt) schlagen konnte. Wohingegen die AR-Gruppe mehr in allen drei Ebenen zu denken versuchte, zentrierte sich die HMD-AR-Gruppe tendenziell auf die repräsentative Ebene. Für den Fall, dass Ebenen kombiniert wurden, verknüpfte die HMD-AR-Gruppe häufig nur zwei ohne dabei auf den Wechsel zwischen Stoff- und Teilchenebene abzielen. Demnach liefern die Analysen erste Hinweise dafür, dass die HMD-AR-Technologie eher die chemische Fachsprache und weniger das Denken in den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) positiv beeinflusst.

12.4 Bewertungen der Testbearbeitungen mittels Punktesystem

In Ergänzung zu den Häufigkeits- und Inhaltsanalysen der Protokolle des Lauten Denkens, ausgewertet mit KAT 1 und KAT 2, wurden die Bearbeitungen der Testaufgaben aller Probanden aus Hauptstudie 2 (N = 60) mittels Punktesystem bewertet.

Deskriptive Statistik und Kovarianzanalyse. Die deskriptive Analyse der Testbewertungen mittels Punktesystem soll einen Einblick in die Testbearbeitungen zum ersten und zweiten Messzeitpunkt hinsichtlich der Aspekte *Fachwissen*, *Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis* und *Fachsprache* geben, sowie Trends zu den Gruppenunterschieden aufzeigen. Tabelle 114 fasst entsprechend die Mittelwerte (*M*) mit zugehörigen Standardabweichungen (*SD*) und ihren Minima (*Min*) bzw. Maxima (*Max*) zusammen. Die deskriptive Statistik (vgl. Tabelle 114) deutet darauf hin, dass das Treatment eine gewissenhaftere Elaboration in Hinblick auf das Denken in den drei Ebenen nach Johnstone (2000) bewirkte. Da die Punktevergabe pro Variable und Messzeitpunkt zwischen 0 und 10 liegen konnte, würde bei einem Mittelwert von 5 das mittlere Skalenniveau erreicht werden. Obgleich sich in Hinblick auf den Umgang mit Stoff- und Teilchenebene bei der Simulations- und AR-Gruppe ein erhöhter Mittelwert von ersten auf zweiten Messzeitpunkt feststellen ließ, wurde die Grenze von 5 zu keinem Zeitpunkt überschritten. Darüber hinaus wurden für die Variable *Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis* relativ hohe Standardabweichungen, mit Werten fast durchweg über 2.0, erreicht. Im Posttest streuten die Werte in der Simulations- und HMD-AR-Gruppe noch stärker um den Mittelpunkt. Lediglich in der AR-Gruppe wurde eine minimierte Streuung diagnostiziert. Hinsichtlich des Fachwissens war die Punkteanzahl bei allen drei Gruppen zu beiden Messzeitpunkten größer als 5. Wohingegen sich die Testbearbeitung bezogen auf das fachliche Vorwissen in der AR-Gruppe minimal verbesserte, sanken die Mittelwerte von Prä- auf Posttest in den anderen beiden Vergleichsgruppen. Dabei wird angemerkt, dass die Werte zum Fachwissen bei der HMD-AR-Gruppe im Posttest wesentlich höher streuten als im Prätest. Mit Blick auf die Fachsprache liefert das Datenmaterial im Prätest ein sehr heterogenes Bild, da sich die Mittelwerte über und unter dem mittleren Skalenniveau bewegten. Jedoch konnten insgesamt, von ersten auf

zweiten Messzeitpunkt, in allen drei Gruppen optimierte Testbearbeitungen mit höheren Streuungen im Posttest als im Prätest gemessen werden.

Tabelle 114. Bewertungen der Testbearbeitungen mittels Punktevergabe von Simulations-, AR- und HMD-AR-Gruppe im Prä- und Posttest mit den Variablen *Fachwissen*, *Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis* und *Chemische Fachsprache*.

	Inhalt	Messzeitpunkt	<i>M</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>	<i>SD</i>
Simulation	Fachwissen	Prä	6.15	4.00	9.00	1.66
		Post	5.65	2.00	8.00	1.53
	Stoff-Teilchen	Prä	4.20	0.00	9.00	2.44
		Post	4.65	0.00	9.00	2.62
	Fachsprache	Prä	5.05	2.00	7.00	1.19
		Post	5.25	2.00	7.00	1.25
AR	Fachwissen	Prä	5.50	3.00	8.00	1.40
		Post	5.60	3.00	9.00	1.67
	Stoff-Teilchen	Prä	3.75	0.00	9.00	2.17
		Post	3.95	0.00	8.00	1.90
	Fachsprache	Prä	4.75	2.00	7.00	1.29
		Post	5.25	3.00	9.00	1.55
HMD-AR	Fachwissen	Prä	6.05	3.00	9.00	1.73
		Post	5.55	2.00	10.00	2.01
	Stoff-Teilchen	Prä	4.70	1.00	8.00	2.39
		Post	4.50	0.00	10.00	2.80
	Fachsprache	Prä	4.95	2.00	8.00	1.36
		Post	5.65	3.00	10.00	1.79

Nachstehend wird aufgeschlüsselt in die zu untersuchenden Variablen *Fachwissen*, *Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis* und *Chemische Fachsprache* eine detaillierte deskriptive Beschreibung angeführt, die differenziert die Bewertungen der Testbearbeitungen der drei Gruppen (Simulation, AR und HMD-AR) beleuchtet. Ferner sollen Kovarianzanalysen Aufschluss darüber geben, ob sich die Posttestergebnisse hinsichtlich des Fachwissens, Stoff-Teilchen-Konzeptverständnisses und der chemischen Fachsprache, unter Berücksichtigung der erreichten Punktezahlen im Prätest, in den drei Gruppen unterscheiden. Hierfür galt es vorerst die Voraussetzungen zur Durchführung der ANCOVA zu prüfen. Es wurden alle Kriterien erfüllt, um eine Kovarianzanalyse zur Messung der Gruppenunterschiede zwischen den drei Gruppen (Simulation, AR und HMD-AR) durchführen zu können: Um Ausreißer zu identifizieren, wurden die Cook-Distanzen begutachtet. Mit Werten von 0.28 bei der Variable *Fachwissen*, 0.33 bei der Variable *Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis* und 0.22 bei der Variable *Chemische Fachsprache*, die das Cut-off Kriterium von 1.0 nicht überschreiten, wurde geschlussfolgert, dass keine Ausreißer vorliegen. Ferner war die Voraussetzung der Homogenität der Varianzen durchweg gegeben, welche der Levene-Test bestätigte (Fachwissen: $p = .684$; Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis: $p = .202$ und Fachsprache: $p = .112$). Gemäß dem Shapiro-Wilk-Test waren die Residuen aller drei zu untersuchenden abhängigen Variablen *Fachwissen*, *Stoff-*

Teilchen-Konzeptverständnis und *Fachsprache* mit $p > .05$ normalverteilt. Zudem bestätigte die visuelle Sichtung der Quantil-Quantil-Diagramme, dass die Normalverteilung durchweg angenommen werden kann. Folglich können die Wirkungen des jeweiligen Treatments auf die abhängigen Variablen, d.h. die jeweilige erreichte Punktzahl im Posttest, nach Bereinigung des Einflusses des erreichten Testergebnisses zu Messzeitpunkt 1, ermittelt werden.

12.4.1 Fachwissen

Abbildung 68 veranschaulicht die Punktevergaben zur Bewertung des Fachwissens in Prä- und Posttest der drei Vergleichsgruppen.

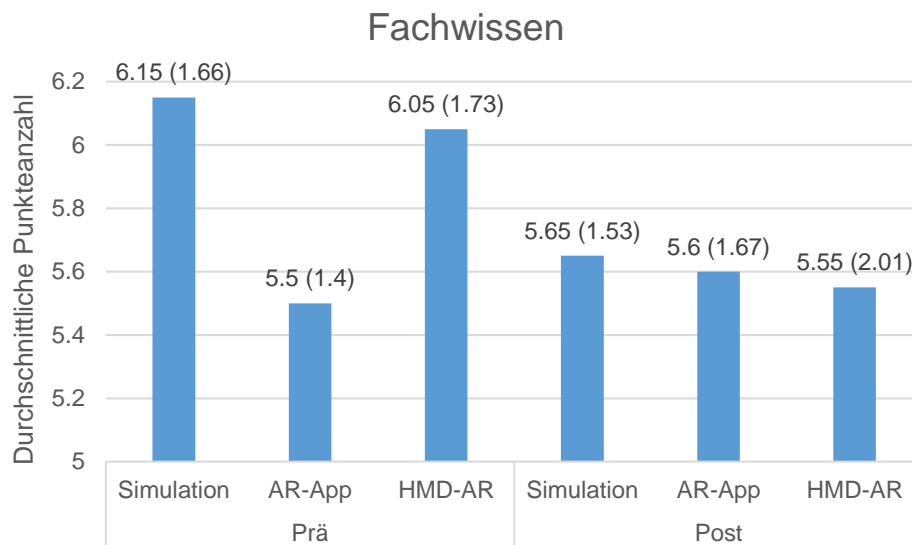


Abbildung 67. Übersicht der erreichten Punktzahlen in den Testbearbeitungen hinsichtlich des Fachwissens von Simulations-, AR- und HMD-AR-Gruppe im Prä- und Posttest mit M (SD).

Die Ergebnisse zeigen von ersten auf zweiten Messzeitpunkt eine minimal erhöhte Punktzahl in der AR-Gruppe mit $M = 5.5$ ($SD = 1.4$) im Prätest und $M = 5.6$ ($SD = 1.67$) im Posttest. Hingegen nahm die Punktzahl zur Beurteilung der Testbearbeitungen der Simulations-Gruppe im Laufe der Datenerhebung mit $M = 6.15$ ($SD = 1.66$) im Prätest und $M = 5.65$ ($SD = 1.53$) im Posttest ab. Auch in der HMD-AR-Gruppe wurden schlechtere Testergebnisse mit $M = 6.05$ ($SD = 1.73$) im Prätest und $M = 5.55$ ($SD = 2.01$) im Posttest diagnostiziert. Darüber hinaus wird betont, dass die AR-Gruppe, im Vergleich zu den beiden anderen Gruppen, im Prätest eine deutlich niedrigere Punktzahl erreichte. Entsprechend handelt es sich um unterschiedliche Voraussetzungen in Hinblick auf das fachliche Vorwissen.

Die Testergebnisse des ersten Messzeitpunkts, bewertet mittels Punktevergabe, unterscheiden sich in Hinblick auf das fachliche Vorwissen statistisch signifikant zwischen den Gruppen, $F(1, 54) = 25.018$, $p < .001$, partielles $\eta^2 = .317$. Nachdem die Testergebnisse hinsichtlich des fachlichen Vorwissens von Messzeitpunkt 1 kontrolliert wurden, liefert die ANCOVA für die Testbearbeitung bezogen auf das Fachwissen im Posttest keine statistisch signifikanten Unterschiede in den drei Gruppen, $F(2, 54) = 0.753$, $p = .476$, partielles $\eta^2 = .027$.

12.4.2 Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis

In Abbildung 69 werden für Messzeitpunkt 1 und 2 die Punktevergaben zur Beurteilung der Testbearbeitungen hinsichtlich des Stoff-Teilchen-Konzeptverständnisses der drei Vergleichsgruppen demonstriert.

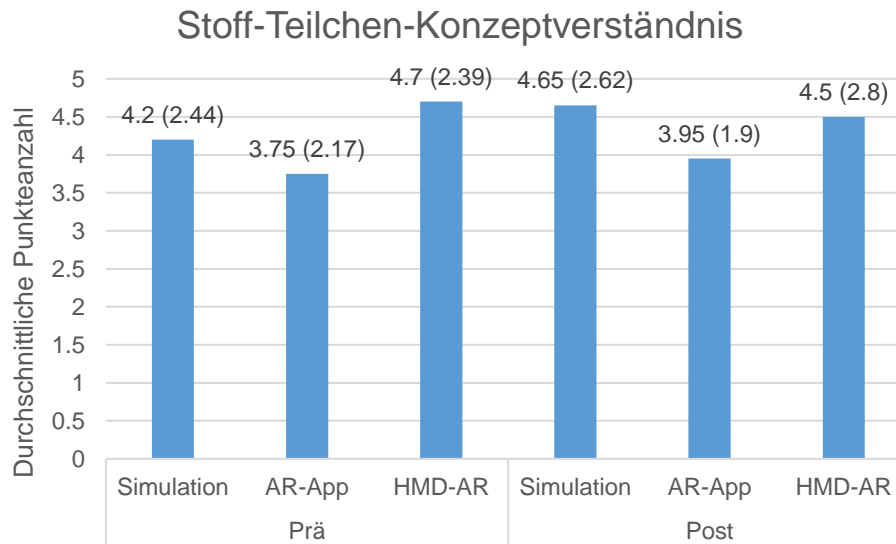


Abbildung 68. Übersicht der erreichten Punkteanzahlen in den Testbearbeitungen hinsichtlich des Stoff-Teilchen-Konzeptverständnisses von Simulations-, AR- und HMD-AR-Gruppe im Prä- und Posttest mit M (SD).

Die beiden Tablet-Gruppen erreichten von Prä- auf Posttest höhere Mittelwerte, wenn es um den Umgang mit Stoff- und Teilchenebene geht. Entsprechend deckt die deskriptive Statistik Mittelwerte von $M = 4.2$ ($SD = 2.44$) im Prätest bzw. $M = 4.65$ ($SD = 2.62$) im Posttest bei der Simulations-Gruppe und Mittelwerte von $M = 3.75$ ($SD = 2.17$) im Prätest bzw. $M = 3.95$ ($SD = 1.90$) im Posttest bei der AR-Gruppe auf. Die Ergebnisse der HMD-AR-Gruppe deuten mit $M = 4.7$ ($SD = 2.39$) im Prätest und $M = 4.5$ ($SD = 2.80$) im Posttest auf eine tendenziell negative Entwicklung des Stoff-Teilchen-Konzeptverständnisses hin. Die Unterschiede zwischen den Messzeitpunkten insgesamt waren marginal. Ferner war das Vorwissen hinsichtlich des Stoff-Teilchen-Konzeptverständnisses bei der AR-Gruppe am niedrigsten ausgeprägt (vgl. Abbildung 69).

Die erreichte Punkteanzahl im Umgang mit Stoff- und Teilchenebene zu Messzeitpunkt 1, d.h. das Vorwissen, unterschied sich statistisch signifikant zwischen den Gruppen, $F(1, 56) = 50.836$, $p < .001$, partielles $\eta^2 = .476$. Auch, wenn die Mittelwerte im Zusammenhang mit der Verwendung von Stoff- und Teilchenebene suggerieren, dass sich die konzeptuelle Aufbereitung der Lernumgebungen positiv auf das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis im Posttest auswirkte, kann dies ohne Prä-Post-Vergleich nicht auf Signifikanz geprüft werden (vgl. Cohen, 1988; Bortz & Döring, 2016). Nach Berücksichtigung der im Prätest erreichten Punkte, wurden keine statistisch signifikanten Gruppenunterschiede für die Testergebnisse

zum Umgang mit Stoff- und Teilchenebene im Posttest festgestellt, $F(2, 56) = 0.432$, $p = .651$, partielles $\eta^2 = .015$.

12.4.3 Chemische Fachsprache

Wird die chemische Fachsprache inspiziert, so verdeutlicht die deskriptive Analyse in Abbildung 70, dass sich durchweg in allen drei Vergleichsgruppen von Messzeitpunkt 1 auf 2 verbesserte Testbearbeitungen messen ließen.

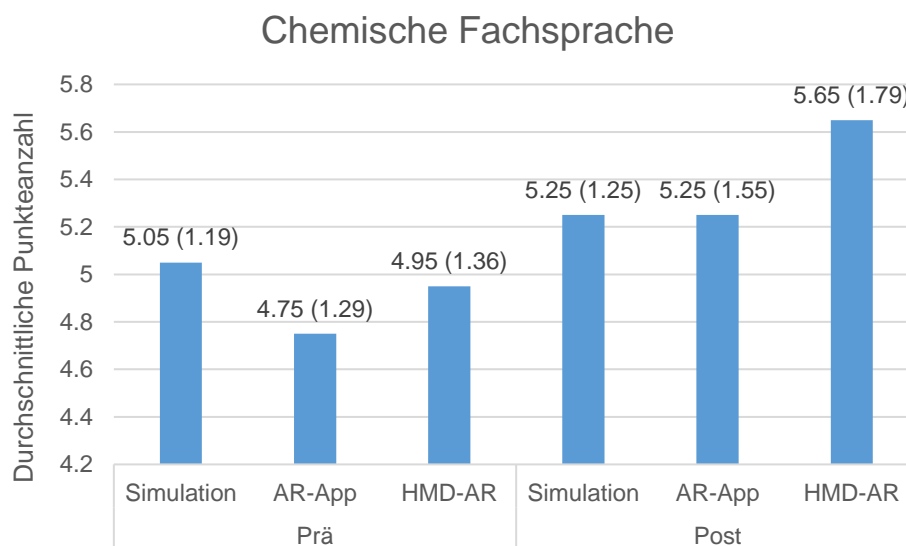


Abbildung 69. Übersicht der erreichten Punkteanzahlen in den Testbearbeitungen hinsichtlich der chemischen Fachsprache von Simulations-, AR- und HMD-AR-Gruppe im Prä- und Posttest mit M (SD).

Die Simulations-Gruppe erreichte im Prätest den Mittelwert $M = 5.05$ ($SD = 1.19$) und im Posttest den Mittelwert $M = 5.25$ ($SD = 1.25$). In der AR-Gruppe wurden Ergebnisse mit $M = 4.75$ ($SD = 1.29$) im Prätest und $M = 5.25$ ($SD = 1.55$) im Posttest verzeichnet. Ihr Vorwissen bezogen auf die chemische Fachsprache fällt am geringsten aus. Die größte Veränderung im Umgang mit (M)ER wurde in der HMD-AR-Gruppe registriert, die eine deutliche Punktezunahme mit $M = 4.95$ ($SD = 1.36$) im Prätest und $M = 5.65$ ($SD = 1.79$) im Posttest erzielte.

Die Ergebnisse zur erreichten Punkteanzahl im Umgang mit (M)ER des Prätests liefern einen statistisch signifikanten Unterschied zwischen den Gruppen, $F(1, 54) = 29.455$, $p < .001$, partielles $\eta^2 = .353$. Ferner zeigen sich, unter Berücksichtigung des ersten Messzeitpunkts, keine statistisch signifikanten Unterschiede in den Testergebnissen hinsichtlich der chemischen Fachsprache zu Messzeitpunkt 2, $F(2, 54) = 0.721$, $p = .491$, partielles $\eta^2 = .026$.

12.4.4 Zusammenfassung der Bewertungen der Testbearbeitungen

Die deskriptive Analyse demonstriert in der AR-Gruppe von ersten auf zweiten Messzeitpunkt eine durchschnittlich verbesserte Testbearbeitung bezogen auf das Fachwissen, wohingegen in den anderen beiden Vergleichsgruppen ein Rückgang an erreichter Punktzahl diagnostiziert wurde. Letztlich fiel es den Probanden der Simulations- und HMD-AR-Gruppe im Posttest

schwerer die Testaufgaben aus fachinhaltlicher Perspektive korrekt zu beantworten. Mit einer geringeren Streuung im Posttest, manifestierten sich in der AR-Gruppe homogenere Befunde. Ferner scheint sich das Treatment der Simulations- und AR-Gruppe positiv auf das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis ausgewirkt zu haben. Obwohl in der Simulations-Gruppe eine höhere Punkteanzahl und damit bessere Testbearbeitung gemessen wurde, lieferten die Analysen tendenziell größere Streuungen. In der AR-Gruppe streuten die Testbewertungen hinsichtlich des Umgangs mit Stoff- und Teilchenebene von ersten auf zweiten Messzeitpunkt weniger. Wird zu guter letzter die chemische Fachsprache betrachtet, so erhöhten sich die in den Testbearbeitungen erreichten Punkteanzahlen, mit niedrigen Standardabweichungen, in allen drei Gruppen. Insbesondere die Testbearbeitungen der HMD-AR-Gruppe verbesserten sich von Messzeitpunkt 1 auf 2 und waren aufgrund der angestiegenen Punkteanzahl im Posttest von höherer Qualität. Im Allgemeinen unterstreichen die deskriptiven Analysen die Ergebnisse der qualitativen Untersuchungen, dass das Konzept der Lernumgebung eine verbesserte Bearbeitung der chemischen Testaufgaben, bezogen auf die Aspekte *Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis* und *Chemische Fachsprache*, bewirkte. Werden die Gruppen miteinander verglichen, so liefert die deskriptive Analyse erste Hinweise auf einen Leistungszuwachs in der AR-Gruppe, da sich das Niveau der Posttestbearbeitungen hinsichtlich aller drei Merkmale erhöhte. Auffallend dabei zeigt sich, dass sich die Testbearbeitung vor allem dann verbesserte, wenn die Probanden ein sehr geringes Vorwissen besaßen. Dieses wurde insbesondere in der AR-Gruppe aufgedeckt. Signifikante Gruppenunterschiede mittels ANCOVA wurden nicht gemessen.

13 Diskussion Hauptstudie 2

Zu Beginn wird in der methodischen Diskussion analysiert, inwiefern die in Hauptstudie 2 eingesetzten Materialien und Methoden zur Untersuchung der Elaborationsprozesse hinsichtlich des Denkens in den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) geeignet waren. Die Lernumgebungen wurden bereits in Kapitel 10 diskutiert. Entsprechend werden insbesondere die Stichprobe, die Erhebungsinstrumente (Prä- und Posttest) sowie die Methode des Lauten Denkens und die in diesem Zusammenhang verwendeten Kategoriensysteme KAT 1 und KAT 2 zur Analyse der kognitiven Verarbeitungsprozesse kritisch reflektiert. Um die Forschungsfragen und Hypothesen (vgl. Kapitel 5.3) umfassend beantworten zu können, schließt sich dann, auf Basis der Ergebnisse von Hauptstudie 2 (vgl. Kapitel 12.2, 12.3 und 12.4), eine inhaltliche Diskussion an.

13.1 Methodische Diskussion

An der Datenerhebung nahmen insgesamt 60 Lehrkräfte teil. Um eine möglichst große Aussagekraft bezogen auf die wissenschaftlichen Fragestellungen zu gewinnen, erfolgte, gezielt nach den zu untersuchenden Merkmalen, die Zusammensetzung der Stichprobe (Döring & Bortz, 2016). Entsprechend wurden Lehrkräfte mit Unterrichtsfach Chemie für die Studienteilnahme ausgewählt. Orientiert an den beiden experimentellen einfaktoriellen Designs (vgl. Kapitel 11.2) arbeiteten jeweils 20 Versuchspersonen mit der simulationsbasierten Lernumgebung oder einer der AR-gestützten Lernumgebungen auf dem Tablet bzw. auf der AR-Brille. Die drei Gruppen (Simulation, AR, HMD-AR) wurden paarweise verglichen, um Aufschluss über die Wirksamkeit von AR und ihrer (immersiven) Interaktivität auf das Verständnis des Stoff-Teilchen-Konzepts zu erhalten. Der große Vorteil dieser experimentellen Überlegung liegt darin, dass es sich um mehrere Experimentalgruppen handelt, die im Zusammenhang mit derselben abhängigen Variable *Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis* (vgl. AV in Kapitel 11.2) stehen. Reagiert, neben der Simulations- und der AR-Gruppe, auch die HMD-AR-Gruppe verschieden stark auf das Treatment, sollte dies ein guter Beleg für die interne Validität von Hauptstudie 2 sein (vgl. Döring & Bortz, 2002; Holland, 1986). Dabei elaborierten alle Probanden die zugehörigen Testaufgaben zu Messzeitpunkt 1 und 2 per Lautem Denken. Gemäß eines qualitativen Stichprobenplans ist eine Zellenbesetzung von 20 für die qualitative Inhaltsanalyse ausreichend (Döring & Bortz, 2016). Ferner wurde die Hälfte des Datenmaterials aus den drei Vergleichsgruppen zusätzlich mittels weiterer Inhaltsanalysen tiefgehend untersucht, sodass sich die Zellenbesetzung auf 10 minimierte, welche laut Döring und Bortz (2016) auch zulässig und folglich groß genug ist. Beim Einsatz der Erhebungsmethode des Lauten Denkens wird empfohlen, die Sitzungsdauer von maximal 90 Minuten nicht zu überschreiten, andernfalls könnten Testlängen- bzw. Ermüdungseffekte auftreten (Sandmann, 2014). Den Versuchsteilnehmenden wurde als grober Anhaltspunkt eine Zeitdauer von jeweils 30 Minuten für die Bearbeitung des Prätests, der Lernumgebung bzw. des Posttests genannt, jedoch konnte diese

zeitliche Vorgabe bei Bedarf auch über- oder unterschritten werden. Mit einer durchschnittlichen Gesamtbearbeitungszeit von ca. 90 Minuten wurde die Richtlinie daher gerade noch eingehalten. Obgleich einige (wenige) Probanden die Datenerhebung bereits nach 60 Minuten beendeten, wurde für die Testbearbeitung des Öfteren auch mehr Zeit beansprucht. Ferner zeigten sich einige Fälle, bei denen die Versuchspersonen den Prätest mit ca. 45 Minuten sehr intensiv elaborierten, wohingegen die Bearbeitung der Lernumgebung oder/und die Elaboration der Testaufgaben zu Messzeitpunkt 2 oberflächlicher und schneller erfolgte. Die digitale Vorbefragung aus Hauptstudie 1 (vgl. Kapitel 8.5) sollte vor Hauptstudie 2 erfolgen, jedoch hatten einige Probanden vorab nicht teilgenommen. Demzufolge füllten betreffende Chemielehrkräfte den digitalen Fragebogen im Zuge des Präsenztreffens direkt vor der Datenerhebung per Lautem Denken aus. Dies verlängerte die Testphase von Hauptstudie nochmals um ca. 30 Minuten und forderte von den Probanden zusätzliche geistige Anstrengungen. Insbesondere gegen Ende der Erhebung sank daher oftmals ihre Bearbeitungsmotivation. Ferner zeigten sich Ermüdungseffekte, die vermutlich, neben dem zeitlichen Aspekt, auch auf das hohe Anforderungsniveau der Testaufgaben zurückzuführen waren. Schließlich könnten sich diese Testlängeneffekte negativ auf die Elaboration ausgewirkt haben. Darüber hinaus offenbarte sich ein Nebeneffekt bei der Arbeit mit der HMD-AR-Lernumgebung. Die Anwendung der AR-Brille schien für manche Versuchspersonen physisch und psychisch herausfordernd gewesen zu sein und folglich die „reibungsfreie“ Bearbeitung der Lernumgebung zu stören (vgl. Kaufeld et al., 2022). Ursache hierfür waren die technischen Rahmenbedingungen, da die Kalibrierung oftmals sehr lange dauerte, die virtuellen Objekte manchmal verpixelt bzw. unscharf waren oder die AR-Brille aufgrund von Hitzeentwicklung, Gewicht sowie Unhandlichkeit zu körperlichen Beschwerden führte (z.B. Druckstellen am Kopf bei Brillenträgern). Entsprechend wurde eine hohe extrinsische kognitive Belastung registriert (vgl. Cognitive Load nach Sweller, 2011). Abgesehen davon dauerte die Einführung zur Bedienung der High-End-Technologie sehr lange, wodurch sich diese Etappe als sehr zeitintensiv zeigte. Es kann daher nicht ausgeschlossen werden, dass die Arbeit mit der HMD-AR-Technik vor allem bei etwaigen technischen Schwierigkeiten eine negative Wirkung auf die Testbearbeitung hatte (vgl. Scheerer, 2021).

Mit der Methode des Lauten Denkens wurde das Ziel verfolgt diverse Aspekte der kognitiven Verarbeitung bei der Elaboration chemischer Testaufgaben vor dem Hintergrund des Denkens in den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) zu erfassen. Da kognitive Verarbeitungsprozesse jedoch erst durch die mündliche oder/und schriftliche Externalisierung der internalen Vorgänge, z.B. in Form von (M)ER beim Lauten Denken, abgebildet werden können (vgl. Ericsson & Simon, 1993), wird eine Schwierigkeit bei dieser Erhebungsmethode ersichtlich. Zwar weist die Introspektion, d.h. die Verbalisierung im Zuge des Lauten Denkens, eine hohe

Prozessbezogenheit auf und erzeugt so handlungsnaher inhaltlich detailreiche Daten, die wichtige Hinweise auf die tatsächlich ablaufenden Verarbeitungsprozesse geben können, jedoch garantieren sie nicht, alle handlungsgesteuerten Kognitionen vollständig abzubilden (Ericsson & Simon, 1993; Konrad, 2010). Die Ergebnisse aus Kapitel 12 sind daher kritisch zu reflektieren (s.u. Kapitel 13.2). Nachdem die Elaborationsverhalten der Chemielehrkräfte möglicherweise nicht vollständig erfasst wurden (vgl. Stebler, 1999), sollten die Befunde mit Vorsicht gedeutet werden. Zudem darf nicht unberücksichtigt bleiben, dass die Methode des Lauten Denkens selbst zu kognitiven Belastungen führen kann (vgl. Weidle & Wagner, 1994). Dies wiederum könnte die Elaborationsprozesse negativ beeinflussen. Demzufolge ist nicht auszuschließen, dass während der Bearbeitung der Testaufgaben die kognitiven Aktivitäten hinsichtlich der Triplet-Beziehung (Johnstone, 1993, 2000) durch das Laute Denken behindert wurden (vgl. Flaherty, 2014). Da die Versuchspersonen aber sorgfältig in die Methode eingeführt wurden, das Laute Denken ausreichend trainierten sowie ohne Störungen in einer geeigneten Atmosphäre (vgl. Kapitel 11.4.3; Sandmann, 2014) elaborieren konnten und insgesamt kaum Schwierigkeiten mit dem Vorgehen des Lauten Denkens zeigten, wird diese Möglichkeit der kognitiven Belastung gering eingeschätzt. Nur wenige Male mussten die Probanden an das Laute Denken erinnert werden, sodass diese insgesamt sehr selbstständig ohne weiterer Anforderungen ihre Gedankengänge laut artikulierten. Neben der Erhebungsmethode sollte auch die angewandte Auswertungsmethode betrachtet werden. Beide in Hauptstudie 2 entwickelten Kategoriensysteme KAT 1 und KAT 2 zur Untersuchung der Protokolle des Lauten Denkens wurden, in Anlehnung an Kroß und Lind (2001), theoriegeleitet (vgl. Kapitel 11.6.1) erstellt und auf Basis der Methode „Qualitative Inhaltsanalyse nach Mayring (2010)“ induktiv am Datenmaterial angepasst. Da die beiden Kategoriensysteme sehr gute Kappa-Werte lieferten (vgl. Döring & Bortz, 2016), was wiederum einer äußerst zufriedenstellenden Inter-Kodierer-Reliabilität entspricht, wird davon ausgegangen, dass die Kategoriensysteme (vgl. Kapitel 12.1.1 und Kapitel 12.1.2) eine objektive Beurteilung der Protokolle ermöglichen (Wirtz & Caspar, 2002). Bei den qualitativen Prä-Post-Vergleichen der Aussagen wurde darauf geachtet, dass die Codings der Testbearbeitungen ein und derselben Versuchsperson entsprangen. In manchen Fällen konnte jedoch diese Zuordnung, aufgrund fehlender Statements in betreffenden Kategorien, nicht getätigt werden, sodass sich ab und zu ein Vergleich unterschiedlicher Probanden aus einer Gruppe anschloss. In der Grundgesamt der jeweiligen Vergleichsgruppe ist dieses Vorgehen durchaus akzeptabel, dennoch sollten die Ergebnisse nur mit Vorsicht interpretiert werden (vgl. Konrad, 2010). Zur Bewertung des Testergebnisses des Posttests unter Kontrolle des Vorwissens wurden die Testaufgaben qualitativ beurteilt und mittels Punktesystem quantifiziert (vgl. Döring & Bortz, 2016). Um ein reliables Vorgehen sicherzustellen, wurde in diesem Zusammenhang der gewichtete Cohens Kappa-Koeffizient κ_w ermittelt. Dieser be-

trug .71 und war damit akzeptabel (Döring & Bortz, 2016). Die zusätzlich durchgeführte ANCOVA zur Ermittlung der Gruppenunterschiede ist aufgrund der kleinen Stichprobengrößen kritisch zu betrachten. Ferner sollten Prä-Post-Vergleiche wie t-Tests durchgeführt werden, um die Testleistungen von ersten auf zweiten Messzeitpunkt auf Signifikanz zu prüfen. Da Prä- und Posttest, bis auf die zwei Ankeraufgaben, inhaltlich nicht identisch waren, konnte diese Analyse nicht eingesetzt werden (vgl. Kapitel 11.6.2). Entsprechend konnte nur auf die deskriptiven Analysen zurückgegriffen werden, wenn es um die Beurteilung des Lernergebnisses unter Kontrolle des Vorwissens geht.

13.2 Inhaltliche Diskussion

FF1₂ geht der Frage nach, ob sich mithilfe der verwendeten AR-Lernumgebung das Konzeptverständnis zum Stoff-Teilchen-Ebenenwechsel und anwendbares Wissen für die reflektierte Verwendung von Stoff- und Teilchenebene bei Chemielehrkräften fördern lassen (vgl. Kapitel 5.3). Für die Beurteilung der Auswirkungen von AR auf das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis wurden die Statements aus den Testbearbeitungen der Simulations- und AR-Gruppe von Messzeitpunkt 1 und 2, ausgewertet mit KAT 1 und KAT 2, sowohl quantitativ als auch qualitativ untersucht. Zunächst werden die Codierungen aus KAT 1 zum Umgang mit Stoff- und Teilchenebene diskutiert. Wird die Elaboration der Lehrkräfte bezogen auf die Differenzierung zwischen Stoff- und Teilchenebene betrachtet, zeigen sich in beiden Gruppen von Prä- auf Posttest positive Entwicklungen, die in ausgeprägterem Maße bei der AR-Gruppe zum Vorschein kamen. Dabei bestätigen die Befunde des Prätests die in Kapitel 2.2.2 angeführten Schwierigkeiten bezüglich des Umgangs mit Stoff- und Teilchenebene bei Lehrkräften (Crawford & Cullin, 2004; Justi & Gilbert, 2002; van Driel & Verloop, 2002). Entsprechend wurden die Ebenen in den Erklärungen sowie Beschreibungen unzureichend voneinander getrennt, ungenügend betont und ihre Wechsel ineinander nur implizit oder fehlerbehaftet hervorgehoben (vgl. Chandrasegaran et al., 2007). Dabei zeigte sich das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis, aufgrund der fachsprachlichen Schwächen und Mängel, sichtlich ausbaufähig (vgl. Kapitel 12.2 und 12.3). In Anlehnung an die Befunde von Renkl (1997) zum beispielhaften Lernen in der Wahrscheinlichkeitsrechnung bestätigt das Datenmaterial die positive Wirkung der konkreten Fokussierung auf Operatoren und bestimmte inhaltliche Details, im Sinne von Zieldefinitionen, auf die Testbearbeitung. Die Häufigkeits- und Inhaltsanalysen zeigen, dass sich die Probanden in der Grundgesamtheit und davon insbesondere die AR-Gruppe, nach dem Treatment sowohl beim „suchorientierten Lernen“ als auch beim „verstehensorientierten Lernen“ stärker auf die Stoffebene konzentrierten (Schmalhofer, 1996). Obgleich Verbalisierungen in Anlehnung an Schnotz (2001b), Verständnisschwierigkeiten ausdrücken können, sodass Quantität und Qualität in keinem linearen Zusammenhang stehen, deuten auch die Quantifizierungen bezüglich der Stoffebene auf eine elaborative, kohärenzfördernde kognitive

Verarbeitung hin (vgl. Kroß & Lind, 2001). Es wurde der Trend ersichtlich, dass sich die Probanden von Messzeitpunkt 1 auf 2 gewissenhafter mit der Stoffebene auseinandersetzten und ein höherer Grad an Kohärenzbildung zwischen den Ebenen erreicht wurde (vgl. Schnotz, 2001b). Daraus wird abgeleitet, dass die konzeptionelle Aufbereitung beider Lernumgebungen, die sich gezielt auf Repräsentations- sowie Stoff-Teilchen-Ebenenwechsel stützte, einen dezidierteren Umgang mit der Stoffebene nach sich zog (Johnstone, 2000; Kozma & Russell, 1997). Durch die intensivere Begutachtung der Stoffebene scheinen die Ebenen nicht nur besser voneinander getrennt worden zu sein, auch wurden häufiger Ebenenwechsel intendiert. Dies spricht insgesamt für ein verbessertes Lernergebnis hinsichtlich des Umgangs mit Stoff- und Teilchenebene, das auch in den Testbewertungen mittels Punktesystem (vgl. Kapitel 12.4) sichtbar wurde. Werden die Codierungen aus KAT 1 begutachtet, so scheint sich der positive Lerneffekt größtenteils in der AR-Gruppe abzubilden, da in den zugehörigen Testbearbeitungen Begrifflichkeiten der Stoff- oder Teilchenebene konkreter angewandt und die Ebenen expliziter voneinander getrennt wurden. Folglich deuten die Ergebnisse, im Einklang mit der bestehenden Literatur, auf ein hohes lernwirksames Potential von AR hin (vgl. Buchner et al., 2021; Buchner & Zumbach, 2020; Dunleavy & Dede, 2014; Keller et al., 2021; Lauer & Pechel, 2023; Wyss et al., 2021; Huwer et al., 2019), das sich auf Beweislage von Hauptstudie 2 auch im Zusammenhang mit dem Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis bemerkbar macht. Die Ergebnisse verweisen darauf, dass die Probanden nach der Elaboration mit der AR-Lernumgebung die gegebenen (M)ER aus den Testaufgaben besser im Arbeitsgedächtnis verarbeiteten (vgl. Schnotz, 2001b). Es liegt die Vermutung nahe, dass die AR-Lernumgebung die Lehrkräfte kognitiv aktiviert hatte, Wissen aus dem Gedächtnis, wie zur Super-Lupe, abzurufen und dezidierter (M)ER auf Stoff- und Teilchenebene anzuwenden. Dabei stützte sich die Externalisierung häufig auf dem Herstellen von Beziehungen zwischen der repräsentativen Ebene und der submikroskopischen oder makroskopischen Ebene (Johnstone, 1993, 2000). Einerseits besteht die Möglichkeit, dass die kognitiven Schemata mit starken Bezügen zum Stoff-Teilchen-Ebenenwechsel bereits vor dem Treatment vorhanden waren, jedoch zum Messzeitpunkt 1 nicht abgerufen werden konnten und erst durch den gewissenhafteren Umgang mit der Stoffebene während des Treatments aktiviert wurden. Andererseits wäre es denkbar, dass das Treatment das Denken in den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) angeregt hatte, mentale Modelle hinsichtlich der Ebenenwechsel während der Arbeit mit der Lernumgebung zu konstruieren, die dann wiederum in das Langzeitgedächtnis überführt und zu Messzeitpunkt 2 abgerufen wurden (vgl. Johnson-Laird et al., 2018). Auch könnten sie direkt bei der Elaboration des Posttests aufgebaut worden sein. Obgleich die Testbearbeitungen des zweiten Messzeitpunktes keinen Aufschluss über den Zeitpunkt der Modellkonstruktionen zum Stoff-Teilchen-Ebenenwechsel geben können, zeigt sich, dass das Vorwissen eine zentrale

Rolle einnahm (vgl. Lind et al., 2004) und einen dominanten Einfluss auf die mentale Vorstellung bzw. Textbasis hatte (Kroß & Lind, 2001; vgl. Schnotz, 2001b). Im Posttest scheinen die kognitiven Schemata bewusster mit den Denkprozessen im Arbeitsgedächtnis verknüpft worden zu sein. Auf Basis der in den Testaufgaben veranschaulichten (M)ER wurden nicht nur Lösungen mit bloßem Fokus auf die Fachinhalte getätigt. Die Befunde deuten vielmehr darauf hin, dass die Probanden während der Elaboration der Testaufgaben häufiger ihr Vorwissen auf Stoff- und Teilchenebene nutzten, um eine Textbasis oder mentale Vorstellung sowie ein Situationsmodell bezüglich der Triplet-Beziehung aufzubauen (vgl. Kroß & Lind, 2001). Dieses Modellierungsverhalten steht im Einklang mit Johnstones' (2000) Annahme, dass das Denken in den drei Ebenen nur dann möglich ist, wenn ausreichend Wissen aus dem Langzeitgedächtnis abgerufen werden kann. Die zugehörigen kognitiven Verarbeitungsprozesse, im Sinne des Deduzierens, Abduzierens und Induzierens, gelingen nur dann, wenn die aufzubauenden mentalen Modelle die Problemstellung gänzlich abbilden (vgl. Johnson-Laird et al., 2018). Andernfalls könnte ein *Expertise Reversal Effect* begünstigt werden, der sich auf der Diskrepanz zwischen bereits vorhandenen fest verankerten Denkmustern und den neu zu verarbeitenden Informationen stützt (Kalyuga et al., 2003). Nachdem der Wissensabruf mit oberflächlicher Anpassung von bestehenden mentalen Modellen größtenteils mit fehlerbehafteten Schlussfolgerungen einherging, liegt die Vermutung nahe, dass die mentalen Modelle noch nicht vorhanden waren, sondern erst während der Bearbeitung des Treatments oder Posttests konstruiert wurden (vgl. Erlenbach & Frank, 2022; Johnson-Laird et al., 2018). Es zeigten sich nämlich positive Effekte, welche durch die tiefenstrukturell-angeleitete Modellkonstruktion erklärt werden können (Erlenbach & Frank, 2022; Evans & Stanovich, 2013; Johnson-Laird et al., 2018; Kahneman, 2011). Insgesamt hat die konzeptionelle Aufbereitung der Lernumgebung, und insbesondere das AR-Setting, eine Konzentrierung auf die Stoffebene nach sich gezogen, die sowohl den Wissensabruf aus dem Gedächtnis als auch die Wissensanwendung begünstigte. Das domänenspezifische Vorwissen der Lehrkräfte (Chi, 2006; Kroß & Lind, 2001; Sweller et al., 1998; Tricot & Sweller, 2014) sollte mittels Treatment aktiviert worden sein, die Konstruktion mentaler Modelle zu unterstützen. Dadurch wurden vermutlich die konkrete Ebenentrennung und -explikation angestrebt, welche insgesamt den adäquaten Ebenenwechsel förderte. Dabei schien vor allem auch die Nutzungseffizienz von (M)ER für das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis ins Zentrum zu rücken (vgl. Frick, 2019; Lewalter, 1997; Schnotz & Bannert, 2003; Schnotz et al., 1996). Durch die Bearbeitung der Lernumgebung mit ihren generativen Lernaufgaben wurden die Probanden vermutlich im Posttest angeregt, ihr elaboriertes Wissen in Form von mündlichen und schriftlichen (M)ER detailreich aufzubereiten (vgl. Scheiter, 2021). Dies würde bedeuten, dass die simulierte Veranschaulichung von Teilchenprozessen mittels unterschiedlicher (M)ER bei realer Versuchsdurchführung, unter Zuhilfenahme von Hinweisen zum Denken in den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000), lernförderlich ist (vgl. Chi &

Wylie, 2014; Fiorella & Mayer, 2021). Nachdem das AR-Setting Split-Attention vermeidet (vgl. Ayres & Sweller, 2021) und die virtuellen Teilchenprozesse räumlich und zeitlich mit der Stoffebene verknüpft (vgl. Kontiguitätsprinzip nach Fiorella & Mayer, 2021), konnten kognitive Modellierungsprozesse initiiert und in der Testbearbeitung zu Messzeitpunkt 2 rekonstruiert werden. Die Testbewertungen aus Kapitel 12.4 untermauern dieses Resultat. Zwar wurden hinsichtlich des Stoff-Teilchen-Konzeptverständnisses in beiden Gruppen verbesserte Lernergebnisse unter Kontrolle des Vorwissens gemessen, welche obendrein in der Simulations-Gruppe etwas höher waren. Die Analysen der AR-Gruppe zeigten sich aber dahingehend aussagekräftiger, dass insgesamt niedrigere Streuungen um den Mittelwert festgestellt wurden und die Standardabweichung von Prä- auf Posttest abnahm. Dies lässt auf ein homogeneres Bild in der AR-Gruppe schließen, welches unter Kontrolle des Vorwissens auf verbesserte Testbearbeitungen hinsichtlich des Stoff-Teilchen-Konzeptverständnisses in der Grundgesamt dieser Gruppe schließen lässt. In der Simulations-Gruppe hingegen nahm die Standardabweichung zu, sodass der angestiegene Mittelwert im Posttest auch auf eine erhöhte Streuung hinweist und kritischer zu betrachten ist. Die größere Spannweite könnte ein Beleg dafür sein, dass sich die simulationsbasierte Lernumgebung nicht für alle Lehrpersonen als Lernmaterial zur Förderung des Stoff-Teilchen-Konzeptverständnisses eignet. Das bedeutet, dass sich zwar mithilfe beider Lernumgebungen, aber in besonderem Maße mit der AR-Technik, das Konzeptverständnis zum Stoff-Teilchen-Ebenenwechsel und anwendbares Wissen für die reflektierte Verwendung von Stoff- und Teilchenebene bei Chemielehrkräften fördern lässt. In Anlehnung an die Studienergebnisse von Keller et al. (2021), Thees et al. (2020) oder Buchner und Zumbach (2020) sollten sich mittels AR Lernprozesse vielversprechend unterstützen lassen. Die genannten Ausführungen bestätigen daher Hypothese H1.1₂, sodass die Verwendung der AR-Lernumgebung das Konzeptverständnis beim Stoff-Teilchen-Ebenenwechsel während der Beobachtung eines realen Versuchsablaufs lernwirksam unterstützt. Dieser Befund ist deckungsgleich mit den Ergebnissen der Physikdidaktiker Altmeyer et al. (2020), die im Zusammenhang mit der Cognitive Load-Theorie (Chandler & Sweller, 1991) die Wirkungen von (non-) AR-gestützten Lernsettings im Physiklabor auf das konzeptionelle Wissen untersuchten. In ihrer Vergleichsstudie wurde aufgedeckt, dass sowohl die non-AR- als auch die AR-gestützte Lernumgebung, beide aufrufbar mit dem Tablet, einen positiven Einfluss auf das reale Experimentieren hatten. Obgleich die Kontiguität in der „klassischen“ digitalen Lernumgebung ohne AR nicht sichergestellt werden konnte, wurde aber ein Split-Attention-Effekt aller Wahrscheinlichkeit nach nicht gemessen (vgl. Altmeyer et al., 2020). Da im Rahmen von Hauptstudie 2 festgestellt wurde, dass auch die simulationsbasierte Lernumgebung unterstützend auf das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis wirkt, scheinen auch hier weder Split-Attention noch der Mangel an Kontiguität die kognitiven Ressourcen der Lehrkräfte merklich zu beeinflussen (vgl. Fiorella & Mayer, 2021; Mayer, 2014; Sweller, 2011). Dieser Befund ist von

großer Bedeutsamkeit, da der Split-Attention-Effekt bei realer Versuchsdurchführung im Labor ursprünglich wesentlich eingeschätzt wurde und sich folglich AR und non-AR nur geringfügig voneinander unterscheiden. Dies lässt auf eine ähnliche kognitive Informationsverarbeitung im Arbeitsgedächtnis schließen (vgl. Altmeyer et al., 2020; Schnotz, 2011; Thees et al., 2020). Auch die Tatsache, dass das Tablet mittlerweile ein „gängiges“ Medium ist und häufig privat im Alltag verwendet wird, könnte sich auf die Lernwirksamkeit ausgewirkt haben. Besitzen digitale Medien eine hohe Authentizität, kann ihr Einsatz die Lernleistung und -motivation positiv beeinflussen (vgl. Kuhn et al., 2017; Kuhn & Vogt, 2015). Auch wenn dadurch die marginalen Gruppenunterschiede nicht erklärt werden können, so könnte wenigstens begründet werden, warum auch die Arbeit mit der non-AR-Lernumgebung, dem „bekannten, authentischen Lernmaterial“, positiv auf das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis wirkte. Darüber hinaus deckte Hauptstudie 2 auf, welche bedeutsame Funktion der chemischen Fachsprache im Zusammenhang mit Stoff- und Teilchenebene zukommt. Aus den Ergebnissen kann geschlossen werden, dass der adäquate Umgang mit (M)ER eine positive Wirkung auf den Stoff-Teilchen-Ebenenwechsel hat. Angesichts dessen offenbarte sich insbesondere bei der AR-Gruppe ein bedachterer Umgang mit der repräsentativen Ebene, indem von Prä- auf Posttest gewissenhafter mit Fachbegriffen elaboriert wurde. In Anbetracht dessen zeigten die Häufigkeits- und Inhaltsanalysen mit KAT 2, dass sich die Probanden beider Gruppen weniger auf der Ebene des „suchorientierten“, sondern mehr auf der Ebene des „verstehensorientierten“ Lernens bewegten (vgl. Schmalhofer, 1996). Ferner stützten sie sich nicht mehr nur auf Texte, vielmehr konzentrierten sie sich auf Symbole mit ihren Verknüpfungen. In diesem Kontext macht das Datenmaterial ersichtlich, wie wichtig die angemessene Nutzung der repräsentativen Ebene zur Differenzierung zwischen Stoff- und Teilchenebene ist (Johnstone, 1993, 2000; Harrison & Treagust, 2000; Talanquer, 2011). Die anfänglichen Schwierigkeiten im Umgang mit der chemischen Fachsprache des Prätests wurden im Posttest sichtlich reduziert, da die Versuchspersonen, vor allem in der AR-Gruppe, einheitlicher mit den ER artikulierten und Texte gewissenhafter von Symbolen trennten. Auffallend dabei waren die einheitlicheren Formulierungen für Erklärungen auf Teilchenebene, welche wiederum die Ebenentrennung sowie -wechsel in die Stoffebene begünstigten. Der Stellenwert von Symbolen erhöhte sich von ersten auf zweiten Messzeitpunkt immens und führte beim oberflächlichen Lernen in beiden Vergleichsgruppen und beim tiefen Lernen insbesondere in der AR-Gruppe zu qualitativ hochwertigeren Aussagen. Folglich scheinen die Probanden durch das Treatment sicherer im Umgang mit Symbolen sowie MER geworden zu sein. Auch die Kategorien zum „suchorientierten Verstehen“ untermauern diesen Befund, da beispielsweise weniger Beziehungssuchen mit den Symbolen getätigt und mehr Kohärenzen gebildet wurden (vgl. Schnotz, 2001a). Zudem demonstrieren die mittels Punktesystem bewerteten Testbearbeitungen zur chemischen Fach-

sprache in beiden Gruppen ein signifikant verbessertes Lernergebnis unter Kontrolle des Vorwissens. Zwar wurden keine Gruppenunterschiede mittels ANCOVA gemessen (vgl. Kapitel 12.4), die deskriptive Analyse offenbarte jedoch insbesondere in der AR-Gruppe eine bessere Testbearbeitung. AR scheint auf Basis von Symbolen und MER kognitive Verarbeitungsprozesse eingeleitet zu haben, die schließlich den Aufbau einer Textbasis sowie einer mentalen Vorstellung begünstigt haben sollten (vgl. Habig, 2019; Altmeyer et al., 2020). Entsprechend liefert das Datenmaterial den Trend, dass sich der Umgang mit der chemischen Fachsprache durch AR optimierte und sich das Verständnis bezüglich der Triplet-Beziehung (vgl. Talanquer, 2011; vgl. Johnstone, 1993, 2000) weiterentwickelte. Dieser Befund lässt sich mit den Ergebnissen von Radu und Schneider (2019) vereinen, dass sich AR positiv auf das multimediale Lernen (vgl. Mayer, 2014; Schnotz, 2005) auswirken kann. Werden nun aber die Bewertungen der Testbearbeitungen aus Kapitel 12.4 näher betrachtet, so wurde in der AR-Gruppe durchweg ein sehr niedriges Vorwissen bezüglich der chemischen Fachsprache und dem Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis gemessen. Aufgrund eines unterschiedlich hoch bzw. niedrig ausgeprägten Vorwissens in der Simulations- und AR-Gruppe besteht die Möglichkeit eines zusätzlichen Nebeneffekts. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass die positiven Effekte hinsichtlich des Elaborationsverhaltens durch das Vorwissen mediiert wurden. Dies würde bedeuten, dass sich die konzeptionelle Aufbereitung der Lernumgebung, unabhängig von den Gruppen, vor allem positiv auf das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis von Novizen auswirkte. Nachdem die Analysen aus Kapitel 12.4 mit nur sehr kleinen Stichprobengrößen durchgeführt wurden, sind ihre Werte aber mit großer Vorsicht zu betrachten. Zwar hat das Vorwissen, wie bereits in der Literatur bestätigt (vgl. Kroß & Lind, 2001; Lind et al., 2005; Schnotz, 2001b) und weiter oben herausgearbeitet, einen großen Einfluss auf das Denken in den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000). Es ist jedoch nicht gesagt, dass es im Rahmen dieser Untersuchung Gruppeneffekte eliminierte und einzige Ursache für die positive Entwicklung der Denk- und Verhaltensmuster war. Auch wenn sich das Vorwissen der AR-Gruppe am geringsten ausgeprägt zeigte, die erreichte Punkteanzahl der Simulations-Gruppe zu Messzeitpunkt 1 fiel hinsichtlich des Denkens in den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) auch niedrig aus. Entsprechend lassen sich die Gruppen mit ihren ähnlichen Voraussetzungen vergleichen. Es wird zwar einschränkend für die Verallgemeinerung betont, dass Textbasen oder mentale Vorstellungen nur schwer erfasst werden können (Konrad, 2010) und die Ergebnisse dieser qualitativen Studie mit größeren Stichproben durchgeführt werden könnten, dennoch deuten die Ergebnisse darauf hin, dass die getroffene Annahme H1.2₂ tendenziell bestätigt werden kann. Es zeigte sich ein positiver Effekt des Treatments beider Gruppen, der vermutlich auf die konzeptionelle Aufbereitung zurückzuführen ist. Darüber hinaus liefert der Gruppenvergleich die Tendenz, dass insbesondere die Nutzung der AR-Lernumgebung durch die Integration der

repräsentativen Ebene in den realen Versuchsaufbau einen positiven Effekt auf das Denken in den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) hatte.

Ferner soll mit **FF2₂** beantwortet werden, ob durch den Umgang mit AR-Repräsentationsformen bei realer Versuchsdurchführung unterschiedliche Elaborationsprofile beschrieben werden können (vgl. Kapitel 5.3). Aus qualitativer Perspektive elaborierten beide Vergleichsgruppen den Prätest in ähnlichem Maße. In Übereinstimmung mit den Befunden internationaler Literatur demonstrierten die Auswertungen mit KAT 1 und KAT 2, dass die Lehrkräfte immense Probleme hatten, adäquat mit der repräsentativen Ebene umzugehen (Treagust et al., 2003; Erlenbach & Frank, 2022). Das „suchorientierte Lernen“ (Schmalhofer, 1996) stützte sich zum ersten Messzeitpunkt auf einem Wissensabruf mit Termini und kurzen Definitionen. Hingegen wurden im Posttest in beiden Gruppen vermehrt ausführlichere Erklärungen und detailreiche Beschreibungen der Fachinhalte abgerufen. Auch die Suche nach Beziehungen war im Prätest bei beiden Gruppe von unpräzisen Formulierungen geprägt, die die Stoffebene inkorrekt mit der Teilchenebene „vermischten“. Von ersten auf zweiten Messzeitpunkt veränderte sich dieses Elaborationsverhalten sowohl in der Simulations- als auch in der AR-Gruppe, indem dezidierter mit der Triplet-Beziehung umgegangen wurde (z.B. Nennung von Fachbegriffen zur Ebenentrennung). Hauptkategorie 2 unterstreicht dieses Resultat. Da der vergebliche Wissensabruf im Prätest eher auf dem Dreieck nach Johnstone (1993, 2000) und im Posttest auf den Fachinhalten fußte, scheinen die Probanden durchweg Sicherheit im Denken in den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) gewonnen zu haben. Dabei verweist das Datenmaterial auf einen gewissenhafteren Umgang mit der Teilchenebene, der sich vor allem in der AR-Gruppe manifestierte. In beiden Gruppen verlagerte sich das „verstehensorientierte Lernen“ von der Fokussierung auf die Teilchenebene in Richtung Stoffebene, wodurch insgesamt sicherer in den drei Ebenen gedacht wurde (z.B. durch Nennung von Definitionen zur Ebenenexplikation). Infolgedessen ist es denkbar, dass sich die von Devetak et al. (2004) oder Al-Balushi (2012) genannten Schwierigkeiten (*Lehrpersonen orientieren sich in ihrer Unterrichtsgestaltung selten an den drei Ebenen nach Johnstone (1993)*); vgl. Kapitel 2.2.2) minimieren oder beheben werden können, wenn sich die Unterrichtsgestaltung an der konzeptionellen Aufbereitung der vorgestellten Lernumgebungen aus Kapitel 8.3 orientiert (z.B. durch Einbindung der Super-Lupe). Ferner demonstrierten die Ergebnisse, dass bei Beachtung der Begrifflichkeiten „Atom“, „Ion“, „Molekül“ usw., Ebenenwechsel dezidierter vollzogen wurden. Vor allem die Statements zum Herstellen von Beziehungen zwischen Stoff- und Teilchenebene (vgl. Kategorie 3.1.2 in Kapitel 12.1) zeigten positive Entwicklungen im Elaborationsverhalten in beiden Gruppen. Da diese Kategorie häufig den Wechsel zwischen Stoff- und Teilchenebene intendierte, korreliert die Quantität der Codierungen tendenziell mit der Qualität der Aussagen und untermauert den Effekt des Treatments auf das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis. Auch in Hinblick auf das „oberflächliche“ und „tiefe“ Verstehen (vgl. Lind et al., 2004) weisen die

Probandenaussagen von AR- und Simulations-Gruppe im Prätest eine vergleichbare Qualität auf, indem beispielsweise chemische Notationen wie Indizes oder Koeffizienten zu Messzeitpunkt 1 häufig vernachlässigt wurden. Diese Schwierigkeiten konnten durch das Treatment nicht vollständig beseitigt, aber vielversprechend gefördert, werden. Die Konzentrierung auf die Stoffebene mittels geeigneter Anwendung von (M)ER führte häufig zu klaren Ebenentrennungen und –wechseln. Die Betonung der Super-Lupe war charakteristisch für ein erfolgreiches Elaborationsverhalten, was sich jedoch nur in der AR-Gruppe offenbarte. Überdies ist die Vorgehensweise bei der Elaboration auf Stoff- und Teilchenebene erwähnenswert. Sobald die Versuchspersonen beim Beschreiben von Lösungswegen beide Ebenen, im Sinne von *top-down*, fokussierten, wurden fehlerbehaftete Aussagen aufgedeckt, da die Ebenen unzureichend voneinander getrennt wurden. Dieser Befund steht im Einklang mit den bisherigen Ergebnissen zum Einfluss des Vorwissens (vgl. Kroß & Lind, 2001). Laut Schnotz (2001b) elaborieren Experten tendenziell getreu der Vorgehensweise *top-down*, wohingegen Novizen eher eine *bottom-up*-Verarbeitung aufzeigen. Da die Probanden beider Gruppen eher ein niedriges Vorwissen hinsichtlich des Denkens in den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) besaßen (s.o. Beantwortung von FF1₂), sollte sich ihre Elaboration auf *bottom-up*-Prozessen stützen. Per se war dies, vor allem im Posttest, der Fall. Entsprechend wurde eine positive Entwicklung des Elaborationsverhaltens in beiden Gruppen registriert, wenn diese die Ebenen differenziert begutachteten, schrittweise Bezüge zwischen ihnen bis hin zum finalen Ebenenwechsel herstellten und nicht von Anfang an beide Ebenen simultan verwendeten. Die Elaboration *bottom-up* sollte demnach ein dezidierteres Denken in den Ebenen nach Johnstone (1993) mit sich führen. Obgleich die Gruppenunterschiede gering waren, so weist die AR-Gruppe eine stärkere Konzentration und einen gewissenhafteren Umgang mit der repräsentativen Ebene als die Simulations-Gruppe auf. Angesichts dessen scheint die AR-Gruppe im Posttest mithilfe der repräsentativen Ebene mehr Kohärenzen gebildet zu haben (vgl. Schnotz, 2001b) und folglich auf einem sprachlich leicht angehobenen Niveau zu kommunizieren. Entsprechend reflektierten die Probanden die Aspekte der Stoff- oder Teilchenebene (z.B. Farben vs. submikroskopische Strukturen) gezielter, trennten die Ebenen gemäß des *bottom-up*-Prozesses strikter und dachten gewissenhafter in den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000). Im Prätest wurden Text und Symbol häufig simultan verwendet und störten damit die einheitliche Ausdrucksweise. Ursache hierfür war, dass Fachbegriffe vernachlässigt wurden, was wiederum zur nebulösen Vermischung von Stoff- und Teilchenebene führte. Im Posttest wurden derartige Aussagen weniger diagnostiziert. Überdies griffen die Lehrpersonen seltener auf Texte und mehr auf Symbole zurück, wobei in der AR-Gruppe größere Verhaltensänderungen registriert wurden. Dabei ähnelte das Elaborationsverhalten beider Gruppen zu Messzeitpunkt 1 mehr dem von Novizen mit niedrigem Vorwissen, da sie sich länger mit den Texten ausei-

nersetzten (Schnotz, 2014) und zu Messzeitpunkt 2 dem von Experten mit höherem Vorwissen, weil sie die Symbole sichtlich länger und fundierter elaborierten (Zhao et al., 2020). Demnach scheinen Symbole vor allem im Posttest eine wichtigere Rolle für die Triplet-Beziehung einzunehmen. Folglich stützte sich die positive Entwicklung des Elaborationsverhaltens mittels Text, zur Differenzierung von Stoff- und Teilchenebene, in beiden Gruppen auf der bewussten Nutzung von Wörtern wie „Molekül“ oder „Gas“ oder der Einbindung von Fachbegriffen wie „Protonierung“. Wohingegen die Simulations-Gruppe heterogen mit der Vielfalt aller (M)ER Lösungswege beschrieb, fokussierte die AR-Gruppe tendenziell stärker die Kombination aus Text, Symbol und Bild. Vor allem diese Verknüpfung von ER scheint den adäquaten Umgang mit den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) am meisten gestärkt zu haben, da das Hilfsmittel Super-Lupe mit Versuchsskizzen kombiniert wurde und dezidierte Stoff-Teilchen-Ebenenwechsel eingeleitet wurden. Die AR-Gruppe scheint, im Vergleich zur Simulations-Gruppe, den Umgang mit MER wesentlich stärker für wichtig zu erachten. Frick (2019) argumentierte, dass Novizen für die Konstruktion multipler mentaler Repräsentation die kombinierte Verwendung verschiedener ER gegenüber den Texten bevorzugen. Demzufolge entspräche das Verhalten beider Vergleichsgruppen, jedoch vor allem das der Simulations-Gruppe, im Posttest dem von Novizen (Lachmayer et al., 2007; Schnotz, 2002; Schnotz et al., 1996). Die Auswertung mit KAT 2 zeigte auf, dass Probanden, die ihre Fehler auf repräsentativer Ebene erkannten, auch gewissenhafter mit Stoff- und Teilchenebene umgingen. Kategorien wie zu den inhaltlichen Fragen an sich selbst untermauern, dass in der Grundgesamtheit sicherer mit den Ebenen umgegangen wurde. Aufgaben 3 zum Hochofen und 4 zum Galvanisieren des Posttests zeigten sich zwar aus fachinhaltlicher Perspektive äußerst herausfordernd, die Bewertungen der Testbearbeitungen mittels Punktevergabe hinsichtlich des Fachwissens deuten aber bei der AR-Gruppe tendenziell auf eine Leistungszunahme hin. Folglich zeigt sich der Trend, dass die AR-Gruppe sicherer im Umgang mit den Fachinhalten zum Donator-Akzeptor-Konzept war. Auch wenn die Punkteanzahl hinsichtlich des Fachwissens in der Simulations-Gruppe deutlich abnahm, gingen beide Gruppen gewissenhafter mit der Triplet-Beziehung (vgl. Johnstone, 1993, 2000) um. Natürlich wirkt sich das Fachwissen auf das Denken in den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) aus. Da die AR-Gruppe aber, trotz der Schwierigkeiten mit den genannten Aufgaben, zum zweiten Messzeitpunkt durchschnittlich eine höhere Punkteanzahl in ihren Testbearbeitungen erreichte, sollte der Nebeneffekt des Einflusses von Fachwissen auf das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis zumindest bei der AR-Gruppe geringer ausfallen. Letztendlich wurden in der Grundgesamtheit beider Vergleichsgruppen von Prä- auf Posttest unterschiedliche Elaborationsprofile aufgedeckt, die auf ein verbessertes Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis hindeuten und folgende vier Aspekte umfassen:

- Verbesserter, gewissenhafterer Umgang mit der Stoffebene

- Deziertere Anwendung der repräsentativen Ebene zur Explikation und Trennung von Stoff- und Teilchenebene
- Adäquatere Anwendung von Stoff-Teilchen-Ebenenwechseln
- Schwerpunksetzung auf den Umgang mit Symbolen (u.a. in Form von MER)

Entgegen der Ergebnisse von Peeters et al. (2023), welche die Wirkung von AR zur Modellierung der submikroskopischen Ebene in Schülerexperimenten nicht bestätigen konnten, deuten die Ergebnisse von Hauptstudie 2 auf den Trend hin, dass AR neue Chancen für das Denken in den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) bietet. Zwar scheint das AR-Setting das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis bereits durch die Fokussierung auf MER und die gezielte Verwendung der Super-Lupe angereichert zu haben, jedoch müssen diese Entwicklungen vorsichtig gedeutet werden. Weder die Repräsentativität der Stichprobe ist eindeutig gegeben noch wurden beträchtliche Gruppenunterschiede diagnostiziert (vgl. Altmeyer et al., 2020). Auch die zusätzlichen Testbewertungen mit ihren sehr kleinen Stichprobengrößen weisen keine signifikanten Unterschiede in den Gruppen zwischen Prä- und Posttest auf. Es wurden lediglich Trends ersichtlich, die durch die Verwendung der AR-Repräsentationsformen bei realer Versuchsdurchführung auf eine tendenzielle Entwicklung unterschiedlicher Elaborationsprofile in den beiden Gruppen hinweisen (vgl. Altmeyer et al., 2020). Ein signifikanter Lernzuwachs in der AR-Gruppe konnte nicht gemessen werden. Es wird daher zusammengefasst, dass das theoretisch hergeleitete und vermutete Potenzial der Innovation AR mit Hauptstudie 2 nicht vollends bestätigt werden konnte. Hypothese H2₂, dass sich durch die Verwendung der AR-Repräsentationsformen bei realer Versuchsdurchführung unterschiedliche Elaborationsprofile entwickeln, sollte daher vorerst verworfen werden.

FF3₂ geht der Frage nach, inwieweit durch die interaktive Verwendung von AR-Repräsentationsformen in der Lernumgebung das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis bei Chemielehrkräften gefördert und entsprechend das Denken in den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) positiv beeinflusst werden kann (vgl. Kapitel 5.3). Um die Wirkung der Interaktivität mit AR auf das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis zu untersuchen, wurden die Statements aus den Testbearbeitungen der AR- und HMD-AR-Gruppe von Messzeitpunkt 1 und 2, ausgewertet mit KAT 1 und KAT 2, sowohl quantitativ als auch qualitativ analysiert. Zunächst werden die Codierungen aus KAT 1 zum Umgang mit Stoff- und Teilchenebene näher auf ihre Effekte geprüft.

In der AR-Gruppe ließen sich von Messzeitpunkt 1 auf 2 eindeutig veränderte Denk- und Verhaltensmuster hinsichtlich des Stoff-Teilchen-Konzeptverständnisses registrieren. In der HMD-AR-Gruppe wurden diesen Entwicklungen nur bedingt aufgedeckt. Werden die Codierungen des Prätests näher untersucht, so konnten auch in der HMD-AR-Gruppe die Schwierigkeiten im Umgang mit den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) festgestellt werden.

Folglich untermauern diese Ergebnisse die Tatsache, dass mangelnde Sprachfertigkeiten (z.B. willkürliches Verknüpfen diverser (M)ER oder fehlender Einsatz von Fachbegriffen) den Wechsel von Stoff- auf Teilchenebene (und umgekehrt) negativ beeinflussen. Ein interessanter Aspekt bei der Elaboration des Prätests war, dass für geladene Teilchen häufig der Begriff „Ion“ verwendet wurde, aber Atome in ihrem Grundzustand nicht als solche betitelt wurden. Dieses Beispiel beschreibt die uneinheitlichen sprachlichen Ausdrucksweisen und verweist auf die Notwendigkeit durchweg alle Teilchen, geladen oder ungeladen, differenziert zu benennen. Ferner zeigte sich, dass die Aussagen zur Stoffebene größtenteils auf Verbindungsnamen und eher selten auf Stoffeigenschaften wie Farbe oder Verformbarkeit abzielten (z.B. Kategorie 3.1.1.2 aus KAT 1). Jedoch ist die Fokussierung auf die stofflichen Eigenschaften von großer Bedeutsamkeit für das Denken in den drei Ebenen nach Johnstone (1993). Obgleich in beiden Gruppen von Prä- auf Posttest mehr „verstehensorientiert“ und weniger „suchorientiert“ elaboriert wurde (vgl. Schmalhofer, 1996), waren die Elaborationsveränderungen hinsichtlich des Umgangs mit Stoff- und Teilchenebene in der AR-Gruppe durchweg stärker ausgeprägt. Zwar scheinen beide Gruppen mehr auf der Ebene des „tiefen Verstehens“ (vgl. Schmalhofer, 1996) elaboriert zu haben, der gewissenhaftere Umgang mit der Stoffebene als positiver Effekt wurde jedoch bei der HMD-AR-Gruppe nur in manchen Kategorien ersichtlich. Entsprechend grenzte sich, trotz ähnlicher quantitativer Entwicklungen der Codings, die Qualität der Aussagen in der HMD-AR-Gruppe stark von jener der AR-Gruppe ab. Die Kategorien zum „oberflächlichen Lernen“ demonstrieren in der HMD-AR-Gruppe kaum Elaborationsveränderungen. Darüber hinaus lieferten die qualitativen Analysen einiger Kategorien (z.B. zur Suche nach Beziehungen auf Stoffebene, vgl. Kategorie 1.2.2 in KAT 1) keinerlei Hinweise auf ein verbessertes Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis nach Bearbeitung der HMD-AR-Lernumgebung mit der AR-Brille. Zwar wurden in der HMD-AR-Gruppe teilweise auch gelungene Stoff-Teilchen-Ebenenwechsel in Form von Nennungen der Super-Lupe als charakteristisches Mittel diagnostiziert (z. B. aus Kategorie 3.1.2 Herstellen von Beziehungen), jedoch war dies eher selten der Fall. Ferner stammten diese Aussagen vorrangig aus Testbearbeitungen von Probanden, die insgesamt bereits im Prätest höhere Punktezahlen erreichten. In diesem Zusammenhang gilt zu erwähnen, dass die Unterschiede in den Beurteilungen der Testbearbeitungen des Prätests zwischen AR- und HMD-AR-Gruppe sehr groß waren. Die Merkmale *Fachwissen* und *Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis* lieferten bei der HMD-AR-Gruppe deutlich höhere Punktezahlen als bei der AR-Gruppe. Auch wenn die Standardabweichungen bei der HMD-AR-Gruppe durchweg größer waren, wurden im Posttest, unter Kontrolle des Vorwissens, deutlich schlechtere Testergebnisse mit einer geringeren Anzahl an erreichten Punkten registriert. Hinsichtlich dieser beiden Merkmale deutet die Bewertung der Testergebnisse darauf hin, dass die HMD-AR-Gruppe eher als Experten angesehen werden können. Die hohen Streuungen könnten sich durch die Motivation der Probanden begründen lassen. Zwar wird AR immer wieder eine

hohe motivationale Stärke zugeschrieben (Buchner & Zumbach, 2020; Lauer & Peschel, 2023), jedoch können die Einstellungen vor Elaborationsbeginn verschieden ausgeprägt sein oder sich im Laufe der Arbeit mit der High-End-Technologie verändern und sich derart auf die erreichten Punktzahlen der Testbearbeitungen auswirken (Knüsel Schäfer, 2020). Insgesamt legt das Datenmaterial die Vermutung nahe, dass sich durch den Umgang mit immersiven, interaktiven AR-Objekten das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis nicht fördern lässt, sondern sogar möglicherweise negativ beeinflusst wurde. Kategorien, wie jene zu den Zweifeln (vgl. Kategorie 3.3.3 in KAT 1), unterstreichen die negative Wirkung in der HMD-AR-Gruppe. Zu Messzeitpunkt 1 äußerte die HMD-AR-Gruppe, im Gegensatz zur AR-Gruppe, mehr und inhaltsreichere Zweifel als zu Messzeitpunkt 2. Laut Frick (2019) entspricht das Elaborationsverhalten beim vermehrten Verbalisieren von Zweifeln dem von Experten, also Lehrkräften mit einem hohen Vorwissen. Dabei kommt es auf Grundlage eines individuellen mentalen Modells und nicht wegen der externen Darstellungen zur Nennung eines Zweifels. Können die vorhandenen aktivierten kognitiven Konstrukte zur Triplet-Beziehung aus dem Langzeitgedächtnis nicht mit den (M)ER auf Stoff- und Teilchenebene zusammengeführt werden, kommt es sodann zur Äußerung eines Zweifels (vgl. Kalyuga et al., 2003). Nachdem die HMD-AR-Gruppe vor allem im Prätest Zweifel hinsichtlich der drei Ebenen nach Johnstone (2000) äußerte, manifestiert sich die Vermutung, dass es sich zu Messzeitpunkt 1 um ein Elaborationsverhalten mit hoher Expertise handelte. Im Posttest hingegen erfolgten derartige Rückgriffe auf mentale Konstrukte kaum. Dies könnte für eine negative Wirkung der Interaktivität von immersiven AR-Objekten auf das Elaborationsverhalten der HMD-AR-Gruppe sprechen. Entgegen der Erwartungen, dass das Sicherstellen von Kontiguität und die Vermeidung von Split-Attention bei der Nutzung der HMD-AR-Technik positive Effekte nach sich ziehen sollte (vgl. Kapitel 5.3), könnte ein hoher *Extraneous load* zu kognitiven Überlastungen führen (vgl. Sweller, 2011) und das Denken in den drei Ebenen nach Johnstone (1993) behindern. Dieser Verdacht steht im Einklang mit den Befunden von Buchner et al. (2021), die das lernförderliche Potential von AR-Brillen gering einstufen. Wenn man bedenkt, dass durch das Immersionserleben Stoff- und Teilchenebene vollkommen miteinander verschmelzen, könnte eine lernbezogene kognitive Belastung durchaus sehr naheliegend sein (vgl. Chandler & Sweller, 1991). AR auf dem Tablet verweist aufgrund der gerahmten Ansicht auf dem Bildschirm tendenziell stärker auf den Modellcharakter. Entsprechend wird der reale Versuchsaufbau auf Stoffebene durch das digitale Medium konkret von den Teilchenprozessen der Lernumgebung getrennt. Das Tablet fungiert gewissermaßen als „Barriere“ zwischen den Ebenen und verhindert vermutlich die Sichtweise des Kontinuums. Obgleich die Inhalte beider Lernumgebungen auf die Teilchenmodellierung hinweisen, erweckte die Arbeit mit der HMD-AR-Technik den Anschein, dass diese Informationen nicht immer aufgerufen werden konnten. Teils scheinen die Probanden, trotz ausgiebiger Einführung in die technische Handhabung der AR-Brille, Probleme mit der Bedienung gehabt

zu haben. Ferner ließ der Tragekomfort der Brille zu wünschen übrig (Kaufeld et al., 2022; vgl. Scheerer, 2021). Gegebenenfalls war es für die Probanden zu ungewohnt, immersiv AR-Objekte anzuklicken. Können die Instruktionen aufgrund technischer Herausforderungen per se schwer ausgeführt werden, so werden vermutlich aus motivationaler Perspektive äußerst negative Effekte herbeigerufen. Überdies könnte, im Gegensatz zu der klassischen AR-Variante auf dem Tablet, das Immersionserleben die Vorstellung des Kontinuums provozieren (vgl. ISB, 2023b). Die Grenze zwischen den virtuellen Objekten als Teilchen mit den realen Objekten auf Stoffebene ist sodann nicht mehr erkennbar und stört die kognitiven Verarbeitungsprozesse. Für den Fall, dass durch die Veranschaulichung der augmentierten (M)ER auf der AR-Brille die Ebenen unzureichend voneinander abgegrenzt wurden, könnten sich fehlerbehaftete Modellierungsprozesse anschließen (vgl. ISB, 2023b; Johnstone, 2000; Schnotz & Bannert, 2003). Dies hätte zur Folge, dass fachlich falsche mentale Modelle konstruiert werden, die nicht mit dem – wenn vorhanden – bestehenden Vorwissen aus dem Langzeitgedächtnis in Verbindung gesetzt werden konnten (vgl. Schnotz, 2001; Johnstone, 1993). Eine Erklärung hierfür wäre dann der *Cognitive Overload*, der sich auf dem Belastungstyp *Intrinsic load* und/oder *Extraneous load* stützt (vgl. Peeters et al., 2023). Besitzt dieser keine ausreichenden kognitiven Ressourcen während der Elaboration mit der HMD-AR-Technologie (vgl. Chandler & Sweller, 1991), kann sich eine Überlastung anschließen (vgl. Buchner et al., 2021; Peeters et al., 2023). Wurde dann zu Messzeitpunkt 2 versucht eine fehlerbehaftete mentale Vorstellung bzw. Testbasis abzurufen, war die erfolgreiche Oberflächen- sowie Tiefenelaboration nicht nur gestört, sondern negativ manipuliert (Johnson-Laird et al., 2018). Dies würde nicht nur erklären, warum die Testbearbeitungen in der HMD-AR-Gruppe hinsichtlich des Umgang mit Stoff- und Teilchenebene schlechter ausfielen, vielmehr würde die Arbeit mit der HMD-AR-Lernumgebung lernhinderliche Ergebnisse bei Experten erzeugen (vgl. Buchner et al., 2021). Entsprechend fassen Erlenbach und Frank (2022) in ihrem Literaturreview *Rolle des Vorwissens beim Lernen mit externalen Repräsentationen* zusammen, dass Signaling-Interventionen Perzeptionsprozesse von außen steuern und damit die kognitiven Aktivitäten auf relevante Aspekte lenken, jedoch einen negativen Einfluss auf Lernende mit hohem Vorwissen haben können (nach Scheiter et al., 2020; Johnson et al. 2012). Angesichts dessen gilt zu berücksichtigen, dass sich auch die Testbearbeitungen hinsichtlich des Fachwissens von Messzeitpunkt 1 auf 2 verschlechterten. Zwar sollte es sich dabei um ein Artefakt der Testkonstruktion handeln, jedoch könnte sich dieser Befund auch als Nebeneffekt, hervorgerufen durch die HMD-AR-Technik, herauskristalisieren. Schließlich zeigten sich die Aufgaben 3 und 4 zur Galvanisierung und zum Hochofen im Posttest sehr herausfordernd für die Probanden, was sich wiederum auf das Denken in den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) ausgewirkt haben könnte. Auch die inhaltliche Untersuchung der Statements (z.B. aus Subkategorie 3.1.3.1 *Teil-*

chenebene wählen) bestätigt, dass die Aussagen der HMD-AR-Gruppe vor allem dann fehlerbehaftet oder von sprachlicher Ungenauigkeit waren, wenn sich die Probanden sehr vertieft mit den Fachinhalten auseinandersetzten. Die Lehrkräfte müssen in der Lage sein, ihr Wissen in diversen Situationen und Kontexten anwenden zu können (Tricot & Sweller, 2014), sind sie jedoch mit den (elektro-) chemischen Inhalten wie jenen der Galvanisierung wenig vertraut, so könnte dies eine Ursache für die mangelnde Problemlösefähigkeit im Posttest sein.

Zwar wurde das sichtlich verbesserte Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis prinzipiell nur in der AR-Gruppe gemessen, jedoch ließ sich in beiden Gruppen, und vor allem in der HMD-AR-Gruppe, eine gezieltere Elaboration mit der repräsentativen Ebene feststellen. Nach dem Treatment wurden durchweg weniger allgemeingültige Inhalte genannt und stärker MER fokussiert, indem beispielsweise detailreiche Skizzen angefertigt oder Symbolschreibweisen näher beschrieben wurden. Obgleich in beiden Gruppen von ersten auf zweiten Messzeitpunkt mehr auf Begrifflichkeiten wie „Atom“ zur Explikation der Teilchenebene geachtet wurde und angesichts dessen die Ebenen gezielter getrennt wurden, in Hinblick auf die Gesamtelaboration über alle Hauptkategorien von KAT 1 hinweg wurde die Triplet-Beziehung nur von der AR-Gruppe dezidiert elaboriert. Die Probanden der HMD-AR-Gruppe konzentrierten sich zwar stärker auf die fachsprachliche Genauigkeit, jedoch konnten Stoff-Teilchen-Ebenenwechsel kaum durchgeführt und die Verbindung zur makroskopischen oder submikroskopischen Ebene selten erfolgreich hergestellt werden. Wohingegen die AR-Gruppe mehr in allen drei Ebenen zu denken versuchte, zentrierte sich die HMD-AR-Gruppe tendenziell auf die repräsentative Ebene per se. Die Bewertungen der Testbearbeitungen mittels Punktesystem hinsichtlich der chemischen Fachsprache (vgl. Kapitel 12.4.3) bestätigen in beiden Gruppen einen optimierten Umgang mit (M)ER. Dieses verbesserte Lernergebnis unter Kontrolle des Vorwissens war jedoch bei der HMD-AR-Gruppe beachtlicher. Entsprechend untermauern die deskriptiven Untersuchungen die Befunde der qualitativen Inhaltsanalysen. Wurden Ebenen kombiniert, so verknüpfte die HMD-AR-Gruppe häufig nur zwei Ebenen ohne auf den Wechsel zwischen Stoff- und Teilchenebene abzielen. Die Daten der HMD-AR-Gruppe verweisen daher tendenziell eher auf eine dezidiertere Nutzung von (M)ER (vgl. Peeters et al., 2023; Schlummer et al., 2021) als auf ein verbessertes Denken in allen drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000). Hypothese H3₂, dass sich der positive Effekt des Denkens in den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) auf beide Gruppen auswirkt, kann folglich nicht eindeutig bestätigt werden. Es wurde der Trend aufgedeckt, dass AR in seinem klassischen Tablet-Format lernförderlich für das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis sein kann, jedoch das Immersionserleben auf der AR-Brille, wenn, nur den Umgang mit der chemischen Fachsprache und damit höchstens implizit das Denken in den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) positiv beeinflusste (vgl. Kapici, 2023). Dabei ist aber nicht auszuschließen, dass sich das Operieren auf repräsentativer Ebene, wie in Kapitel 2 geschildert, gewinnbringend auf das spätere Herstellen von

Beziehungen zwischen Stoff- und Teilchenebene auswirken könnte. Aufgrund der geringen Stichprobengröße für quantitative Analysen, der fehlenden Prä-Post-Vergleiche, wegen den methodischen Einschränkungen (vgl. Kapitel 13.1), sowie den analytischen Herausforderungen mentale Modellkonstruktionen zu erfassen, kann dieser Befund aber nur als erste Tendenz betrachtet werden. Es sollten sich weitere (post-hoc) Analysen anschließen.

Mit Forschungsfrage **FF4₂** soll geklärt werden, ob durch den interaktiven Umgang mit AR-Repräsentationsformen bei der Durchführung eines realen chemischen Versuchs unterschiedliche Elaborationsprofile beschrieben werden können (vgl. Kapitel 5.3).

Aus qualitativer Perspektive hatten beide Vergleichsgruppen im Prätest ähnliche Schwierigkeiten im Umgang mit Stoff- und Teilchenebene (vgl. Auswertungen mit KAT 1 und KAT 2). Dabei wurde auch ersichtlich, dass sich diese Probleme vorrangig auf der fehlerbehafteten Verwendung der repräsentativen Ebene stützten (vgl. Erlenbach & Frank, 2022; Treagust et al., 2003). Der qualitative Gruppenvergleich der Statements aus Prä- und Posttest offenbarte zwar in beiden Gruppen eine stärkere Konzentrierung auf die chemische Fachsprache, jedoch scheint sich das Denken in den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) lediglich bei der AR-Gruppe positiv entwickelt zu haben. Wohingegen in der AR-Gruppe eine gewissenhaftere Auseinandersetzung mit der Stoffebene gemessen wurde, lieferte die HMD-AR-Gruppe dafür lediglich erste Anzeichen. Wenn es um die Triplet-Beziehung geht, scheint bei der HMD-AR-Gruppe in erster Linie die chemische Fachsprache der Prädiktor für die Explikation der Ebenen zu sein. Dabei fußten die Aussagen beider Gruppen im Posttest weniger auf Texten und mehr auf Symbolen sowie deren Kombinationen. Eine Schwierigkeit für Lehrkräfte besteht darin, Prozesse auf Teilchenebene mithilfe von Symbolen zu erläutern. Die erhöhte Nutzung der Symbole im Posttest spricht für ein verbessertes Elaborationsverhalten, da die Lehrkräfte die Wichtigkeit von Modellen auf submikroskopischer Ebene eher verstehen (vgl. Farida et al., 2010). Es liegt daher der Verdacht nahe, dass AR die bewusste Auseinandersetzung mit Symbolen fördert, wodurch das mit Wissen aus dem Langzeitgedächtnis angereicherte mentale Modell im Arbeitsgedächtnis angeregt und ein Denken in den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) eingeleitet wurde. Durch den verstärkten visuellen Bezug zu Symbolen, vorrangig auf Teilchenebene, scheinen Chemielehrkräfte im Posttest ihr Vorwissen hinsichtlich der Triplet-Beziehung besser abzurufen. Dabei erfolgte in der HMD-AR-Gruppe ein gewissenhafterer Umgang mit den Fachbegriffen, der vermehrt Bezüge zwischen Text und Symbol in Hinblick auf Stoff- und Teilchenebene herstellte, aber Ebenenwechsel selten anstrebte. Dabei betonte die HMD-AR-Gruppe durchweg in allen Kategorien die zentrale Rolle der repräsentativen Ebene (z.B. in Kategorie 3.2.1.3) und beschrieb von Prä- auf Posttest konkreter ihr Vorgehen in Hinblick auf die ER-Wahl und -Anwendung. Diese bewusste Auseinandersetzung mit den (M)ER wurde in den Statements der AR-Gruppe seltener diagnostiziert. Die qualitative Inhaltsanalyse deckte in der HMD-AR-Gruppe von Messzeitpunkt 1 auf 2 nur bedingt eine

verbesserte Qualität der Statements auf. KAT 2 demonstriert, dass angestrebte Ebenenwechsel im Posttest häufig sogar falsch waren. Wohingegen die AR-Gruppe des Öfteren explizit das Teilchenmodell fokussierte, setzte sich die HMD-AR-Gruppe mit den (M)ER auseinander. Nachdem das Vorwissen zum Umgang mit Stoff- und Teilchenebene zu Messzeitpunkt 1 bei der HMD-AR-Gruppe hoch eingestuft wurde, scheinen die kognitiven Schemata nur selten mit den (M)ER auf Stoff- und Teilchenebene übereinzustimmen (Johnstone, 2000; Schnotz, 2001b; Talanquer, 2011), was vermutlich die kognitive Verarbeitung der Testinhalte behinderte (vgl. Buchner et al., 2021; Peeters et al., 2023). Infolgedessen würde es sich bei den mentalen Modellen hinsichtlich des Stoff-Teilchen-Konzeptverständnisses der HMD-AR-Gruppe um fest im Langzeitgedächtnis verankerte analoge Repräsentationen handeln, welche unflexibel und nur langsam veränderbar sind (vgl. Genter & Stevens, 1983; Genter & Whitley, 1997). Halten die Lehrkräfte unentwegt an ihrem individuellen mentalen Modell fest, unabhängig davon ob dieses korrekt ist oder nicht, wirken sich die im Langzeitgedächtnis gespeicherten kognitiven Schemata sehr stark auf das neu zu bildende mentale Modell im Arbeitsgedächtnis aus. Dies würde erklären, warum die Ebenenwechsel zu Messzeitpunkt 2 kaum intendiert, sondern für den Fall des Anwendungsversuchs häufig fehlerbehaftet waren. Dies würde auch erklären, warum bei der HMD-AR-Gruppe die erreichte Punktzahl der Testergebnisse hinsichtlich des Umgangs mit Stoff- und Teilchenebene sank (vgl. Kalyuga et al., 2003). Fraglich bleibt dann aber, warum die HMD-AR-Gruppe trotz des höheren Vorwissens zum Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis ähnliche Schwierigkeiten wie die AR-Gruppe zu Messzeitpunkt 1 aufzeigte. Die Ergebnisse der quantitativen und qualitativen Analysen weisen dahingehend auf einen Widerspruch hin, der dringlich mit weiteren Forschungsansätzen näher untersucht werden muss. Vor allem der Einfluss des Vorwissens sollte dabei im Zentrum der Analysen stehen (vgl. Erlenbach & Frank, 2022; Kroß & Lind, 2001; Lind et al., 2005). Da bezogen auf die chemische Fachsprache das Vorwissen der HMD-AR-Gruppe einem ähnlichen Niveau wie dem der AR-Gruppe entsprach (vgl. Kapitel 12.2.2 und 12.3.2) und schließlich weit ausbaufähig war, wird ersichtlich, warum sich die HMD-AR-Gruppe vorrangig diesem Merkmal zuwandte. Können kognitive Modellierungsprozesse hinsichtlich Stoff- und Teilchenebene mithilfe der AR-Brille nicht initiiert werden, so gleicht ihr Elaborationsverhalten bezüglich des Umgangs mit (M)ER dem von Novizen (vgl. Lachmayer et al., 2007; Schnotz, 2014; Schnotz et al., 1996). *Bottom-up* erfolgte eine Zentralisierung auf die repräsentative Ebene, die jedoch nur selten Verknüpfungen zu Stoff- oder/und Teilchenebene ermöglichte. Ein Zeichen für den gewissenhafteren Umgang mit der repräsentativen Ebene durch immersive AR-Objekte, könnte die Anwendung von (M)ER ohne Einbindung von Stoff- und Teilchenebene sein. Lehrkräfte argumentierten lediglich auf der repräsentativen Ebene, wenn sie nicht in der Lage waren durch die Triplet-Beziehung eine geeignete Lösung zu entwickeln. Folglich scheint der Umgang mit (M)ER die Elaboration auf Stoff- und Teilchenebene zu ersetzen. Stattdessen

wurden die Verknüpfungen der ER betrachtet, einzelne Darstellungsformen beschrieben und Erklärungen höchstens in Bezug auf Stoff- oder Teilchenebene angestellt. Wurden die beiden Ebenen spezifisch betrachtet, so bestätigten die Verhaltens- und Denkmuster aus Prä- und Posttest dennoch, dass ein angemessenes fachsprachliches Niveau mit Fokussierungen auf Koeffizienten oder Fachbegriffen wie „Ionen“ usw. einen zielbewussteren Umgang mit Stoff- und Teilchenebene nach sich ziehen kann. Beispielsweise offenbarten die Ergebnisse der HMD-AR-Gruppe, dass durch die Anwendung von Text und Symbol vor allem gewissenhafter auf Teilchenebene elaboriert und planvoller an die Aufgaben herangegangen wurde. Aufgrund der sprachlichen Feinheiten wie der adäquaten Nutzung von Begriffen der Teilchenebene erlangten die Aussagen der HMD-AR-Gruppe dann, bewusst oder unbewusst, ein höheres sprachliches Niveau. Zwar scheint das Fachwissen die Entwicklung der Elaborationsprofile auch bei der HMD-AR-Gruppe beeinflusst zu haben, da beispielsweise Aufgabe 3 des Posttests zum Hochofen sehr herausfordernd war, jedoch konzentrierten sich die Probanden der HMD-AR-Gruppe weiterhin stark auf die chemische Fachsprache. Dieses Ergebnis grenzt sich von der AR-Gruppe ab, die im Posttest insgesamt verstärkt die Fachinhalte und weniger die drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) anvisierte. Als Ursache hierfür werden die unterschiedlichen Voraussetzungen hinsichtlich des Fachwissens angeführt. Entsprechend zeigt sich in Hinblick auf das Fachwissen der Trend, dass die HMD-AR-Gruppe als Experten und die AR-Gruppe als Novizen einzustufen waren (Schnotz, 2014). Aus kognitionspsychologischer Perspektive kann daher geschlussfolgert werden, dass die fachinhaltliche Klärung bei der HMD-AR-Gruppe weniger elaboriert wurde, da die Probanden größtenteils auf geeignete kognitive Konstrukte aus ihrem Langzeitgedächtnis zurückgriffen und die gegebenen Informationen der Testaufgaben im Arbeitsgedächtnis durch Konstruktion mentaler Modelle verarbeiten konnten (vgl. Schnotz, 2014). Nachdem der Umgang mit der repräsentativen Ebene bei der HMD-AR-Gruppe auf weitaus intensiveren Modellierungsprozessen als bei der AR-Gruppe fußte und das Denken in den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) durch das Immersionserleben nur marginal positiv beeinflusst wurde, kann Hypothese H4₂ tendenziell bestätigt werden. Zwar sollten die methodischen Aspekte hinsichtlich der qualitativen und quantitativen Analyse noch immer kritisch betrachtet werden, es scheinen sich aber zwei unterschiedliche Elaborationsprofile, in Abhängigkeit von der interaktiven Nutzung der AR-Repräsentationen und ihrer Immersionsstärke bei Durchführung eines realen Versuchs, entwickelt zu haben.

VII AUSBLICK UND RELEVANZ

14 Implikationen für die Forschung und Praxisrelevanz für die (Hoch-) Schule**14.1 Implikationen die fachdidaktische Lehr- und Lernforschung**

Aus den Befunden der vorliegenden Dissertationsarbeit lassen sich folgende Schlussfolgerungen für die fachdidaktische Lehr- und Lernforschung ziehen.

Die Erfassung der Akzeptanz und Usability erfolgte mithilfe eines Fragebogens, welcher speziell für die zu bearbeitenden Lernumgebungen konstruiert und auf Reliabilität und Validität überprüft wurde. Im Rahmen dieser Arbeit gelang es ein Messinstrument zu entwickeln, das beide Gütekriterien berücksichtigt. Bereits bei der Erstellung der Fragebögen wurde auf konstruktvalide Itemkombinationen (vgl. Kapitel 6.3.1 und 6.3.2) geachtet. Ferner lieferte die Skalenanalyse akzeptable bis sehr gute Werte der internen Konsistenz. In Hinblick auf die vier Dimensionen *fachdidaktische*, *mediendidaktische* und *funktionale Gestaltung* sowie *Didaktik: Schultransfer* könnte sich eine Faktorenanalyse anschließen, die jedoch im Zuge der bisherigen Untersuchungen vernachlässigt wurde. Entsprechend sollten zukünftige Forschungen das Messinstrument bezogen auf die Faktoren weitergehend analysieren.

Ob sich die Lehr- und Lernprozesse von ersten auf zweiten Messzeitpunkt verbesserten, wurde mithilfe einer qualitativen Bewertung der Testbearbeitungen mit anschließender Punktevergabe gemessen. Dabei konnte die Testleistung quantitativ nicht erfasst und varianzanalytisch verglichen werden. Einerseits waren Prä- und Posttest nicht vollständig identisch, andererseits handelte es sich um eine geringe Anzahl an Testbearbeitungen per Lautem Denken, deren qualitative und nicht quantitative Beurteilung fokussiert wurde. Die Entwicklung eines quantitativen Messinstrumentes, das die Testleistung hinsichtlich des Stoff-Teilchen-Konzeptverständnisses, der chemischen Fachsprache und des Fachwissens operationalisiert, sollte tieferen Einblick in die Wirksamkeit von AR geben und stellt demnach eine wichtige Aufgabe für die zukünftige fachdidaktische Lehr- und Lernforschung dar.

Das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis und der Umgang mit der chemischen Fachsprache wurden durch Prä- und Posttest, mit jeweils fünf Testaufgaben erhoben. In den Testaufgaben dieser Dissertationsarbeit wurden die Symbole gleichzeitig mit den Texten dargeboten. Die Bildung kohärenter Denkmodelle aus Text und Symbol kann mit Blick auf das multimediale Lernen sehr herausfordernd sein (Schnotz, 2002). Folglich wäre es denkbar, dass die Lehrpersonen, getreu der Methode des Scaffoldings (Eitel et al., 2013), die Informationen nur aus dem Symbol extrahieren und als mentales Gerüst nutzen, um so wiederum die Entwicklung eines mentalen Modells zu begünstigen (vgl. Eitel et al., 2013; Frick, 2019). Zwischen den Testbearbeitungen fand die Elaboration der simulationsbasierten, HMD-AR- oder AR-Lernumgebung statt. Bei der Entwicklung dieser Lernumgebungen stand die Systemqualität (Usability)

im Zentrum (vgl. Kapitel 4.4.2). Die zukünftige AR-Forschung sollte sich stärker zu den Aspekten der Usability hinwenden (Lauer & Peschel, 2023), damit kognitionspsychologisch adäquate und innovative Unterrichtsmaterialien konzipiert werden können. Mit Blick auf die Anwendung in der Praxis muss das offenbar wesentliche Merkmal der Interaktion von Lernendem und Lernmedium stärker berücksichtigt werden (Karapanos et al., 2018). Die Ergebnisse dieser Dissertationsarbeit demonstrierten, dass die Usability wesentlicher Einflussfaktor auf die Akzeptanz des digitalen Lehr- und Lernmaterials ist. Ferner wurde deutlich, dass technische Schwierigkeiten mit dem Medium, wie es im Zuge der vorgestellten Forschung bei der AR-Brille zum Vorschein kam, die Elaboration stören und infolgedessen die Konstruktion von Denkmodellen behindern können. Die AR-Technologie scheint, insbesondere hinsichtlich ihres schulischen Angebotsspektrums, noch im Anfangsstadium zu sein. Entsprechend zeigte sich vor allem die Usability der HMD-AR-Lernumgebung ausbaufähig. Die HMD-AR-Technologie ist ein komplexes System und kann nur bei einwandfreier Funktionsfähigkeit als geeignetes Vergleichsmaterial zum „regulären“ AR-Szenario auf dem Tablet eingesetzt werden. Um die kognitiven Verarbeitungsprozesse bei der Elaboration mit der AR-Brille besser fördern zu können, sollte die Hardware daher erneut hinsichtlich der Kriterien „Akkulaufzeit“, „optimierte Wärmeableitung“, „Bewegungssensoren“ und „Prozessoren“ sowie „Kamera- und Bildschirmqualität“ modifiziert werden. Auf dieser Grundlage können sich dann insgesamt inhaltsgleiche Überarbeitungen aller drei Lernumgebungen bezogen auf das User Interface, Layout, die Navigation und die konzeptionelle Darbietung der Lernpfade mit ihren Aufgaben usw. anschließen (vgl. Kapitel 9.1.2). Ferner sollte bei den beiden AR-Lernumgebungen die Detektion des Markers zur Projektion der virtuellen Objekte auf den realen Hintergrund optimiert werden. An dieser Stelle sollte die Herausforderung der „visually induced motion sickness“ (VIMS) nicht vergessen werden, welche der Verwendung von innovativen Technologien Übelkeit, Orientierungslosigkeit oder okulomotorische Schwierigkeiten nachsagt. VIMS wurde zwar vorrangig bei der VR-Technologie untersucht und bestätigt, jedoch können ähnliche Symptome laut Kaufeld et al. (2022) auch bei der Nutzung von dynamischen AR-Objekten auftreten und müssen daher in perspektivischen Forschungsarbeiten stärker berücksichtigt werden. Darüber hinaus muss AR dringend vor dem Hintergrund der gesellschaftlichen Veränderungen durch die Digitalisierung theoretisch diskutiert werden (Irion & Knoblauch, 2021 nach Lauer & Peschel, 2021). Nach Optimierung der Usability der drei Lernumgebungen, wobei die technischen Weiterentwicklungen der HMD-AR-Technik im Zentrum stehen, könnten die Untersuchungen aus Hauptstudie 1 und 2 wiederholt werden. Einerseits sollte sich durch die Minimierung des *Extraneous Loads* der Nebeneffekt, welcher durch die technischen Herausforderungen hervorgerufen wurde, beseitigt werden, sodass sich eine systematische Analyse der Lernwirksamkeit von AR für den Chemieunterricht anschließen kann (Mayer, 2014b). Andererseits

empfiehlt sich die erneute Evaluation mit diesen Erhebungsmethoden und größeren Stichproben, um ihre Allgemeingültigkeit weiter zu prüfen. Aufbauend auf dem in dieser Forschungsarbeit fokussierten Untersuchungsgegenstand des Stoff-Teilchen-Konzeptverständnisses wäre es denkbar, in weiteren Anschlussforschungen gezielt die Akzeptanz und Usability von AR-Lernumgebungen, ohne den Einschluss der simulationsbasierten App, zu untersuchen. Überdies wurden mit den Befunden dieser Dissertationsarbeit erste Hinweise für den Einfluss der Merkmale des Individuums und der Lernumgebung auf die Akzeptanz von digitalen Lernumgebungen gegeben. Ferner verweisen sie auf einen direkten Zusammenhang mit der Einstellungsakzeptanz und auf einen indirekten Zusammenhang mit der Nutzung von AR-Lernumgebungen (Verhaltensakzeptanz; vgl. Bürg, 2005). Angesichts dessen sollten sich mit der fortschreitenden Implementierung von AR an Schulen Erhebungen zur Verhaltensakzeptanz anschließen. Es könnten sodann die Zusammenhänge zwischen den Einstellungsskalen mit der Nutzung von AR-Lernumgebungen (vgl. Naumann et al., 2001) geprüft werden. In Hinblick auf die perspektivische Implementation von innovativen Technologien wie AR im Unterricht, bleibt zu klären, ob und wie die AR-Lernumgebung nach ihrer Testung und Beurteilung von den Lehrpersonen im Fachunterricht eingesetzt wird. Es könnten sich Unterrichtsbeobachtungen zur Analyse der konkreten Umsetzung an den Schulen anschließen. Die AR-Lernumgebung wird dann hinsichtlich seiner praktischen Eignung für den Fachunterricht erprobt. Zudem sollten Zusammenhangsanalysen zwischen den Personenmerkmalen (Einstellungen und Selbstwirksamkeit) oder den Merkmalen der Lernumgebung (Usability) und dem Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis wichtige Einblicke in die Denk- und Verhaltensmuster der Lehrpersonen geben.

Um der Frage nachzugehen, welche Chancen und Grenzen AR bei der Professionalisierung von Lehrkräften aufweist und inwiefern AR als Lehr- und Lernwerkzeug zur Förderung des Stoff-Teilchen-Konzeptverständnisses eingesetzt werden kann, sollten sich weiterführende Untersuchungen zum *Cognitive Load* anschließen (Buchner et al., 2021; Buchner & Freisleben-Teutscher, 2020; Keller & Habig, 2022; Wyss et al., 2021). In Übereinstimmung mit Buchner et al. (2021) deuten die Ergebnisse der vorliegenden Dissertationsarbeit darauf hin, dass "einfachere" AR-Lernszenarien die kognitive Belastung reduzieren, wohingegen AR-Brillen zu einer kognitiven Überlastung führen (vgl. Thees et al. 2020; Altmeyer et al. 2020). Entsprechend sollte die Wirksamkeit von AR zur Förderung des Stoff-Teilchen-Konzeptverständnisses vor dem Hintergrund der intrinsischen und extrinsischen kognitiven Belastung analysiert werden, um weitergehend Aussagen zur lernbezogenen Belastung tätigen zu können. In diesem Zusammenhang sollte zwischen geringerem und höherem Vorwissen unterschieden werden (Buchner et al., 2021). Dass bereits die Bearbeitungen des Prätests zu unterschiedlichen Elaborationsverhalten führten, wird als Indiz für unterschiedliche Voraussetzungen der Lehrpersonen gewertet. Die Ergebnisse dieser Arbeit unterstreichen daher die Notwendigkeit eines

Experten-Novizen-Vergleichs (vgl. Kroß & Lind, 2001). Auf Basis der TPACK-Kompetenzen oder des chemischen Fachwissens könnten die Lehrpersonen in zwei Gruppen unterteilt werden (vgl. Scheiter, 2021), um systematisch den Einfluss des medienbezogenen oder fachlichen Vorwissens auf das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis zu erfassen. Zwar wurde das Fachwissen als Kontrollvariable in der vorliegenden Arbeit mit aufgenommen (vgl. Kapitel 11.6.2). Mittels statistischer Analyseverfahren sollten die Untersuchungen aber eingehender unter dem Aspekt der unterschiedlichen Expertisen der Lehrkräfte (Chemieexperten/-novizen, Technologieexperten/-novizen) verstetigt werden (Kroß & Lind, 2001; Erlenbach & Frank, 2022; Lind et al., 2005).

Für die Forschungen zur Lernförderlichkeit von technischen Innovationen bieten qualitative Evaluationsmodelle diverse Möglichkeiten, die noch ausgeschöpft und durch ihre Vielseitigkeit Forschungsobjekte durchleuchten können. Die fortschreitenden technischen Entwicklungen auf Hard- und Softwareebene mit all ihren instruktionalen Gestaltungsmöglichkeiten sind dafür verantwortlich, dass die Wirksamkeit digitaler Medien, trotz langjähriger Forschungen zu multimedialem, digitalgestütztem Lernen, auch fortlaufend untersucht werden muss (Wyss et al., 2022; Nerdel & Kotzebue, 2020). Daher könnten perspektivisch weitere AR-Lehr- und Lernszenarien für den MINT-Unterricht realisiert und evaluiert werden. Entsprechend ist ein Übertrag des Themenschwerpunkts der Studie auf weitere Fachinhalte denkbar, die nicht das Donator-Akzeptor-Konzept, sondern andere (komplexere) chemische Bereiche (z.B. Struktur-Eigenschafts-Konzept, exemplarisch zur Wasserlöslichkeit, oder Konzept des chemischen Gleichgewichts, exemplarisch zum kleinsten Zwang nach LeChatelier) fokussieren. Überdies könnten mit Blick auf den Umgang mit (M)ER statt des Schwerpunkts „Texte und Symbole“ auch die Repräsentationen *Bilder* oder *Diagramme* usw. betrachtet werden (vgl. Lauer & Peschel, 2021). Wird das AR-Setting auf einen anderen Fachinhalt übertragen, könnte sich zudem ein Forschungsdesign anschließen, das einen Gruppenwechsel hinsichtlich der Bearbeitung der non-AR- bzw. AR-Lernumgebung beinhaltet. Es ist nicht auszuschließen, dass im Rahmen eines Wartegruppensdesigns Effekte postuliert werden können. Außerdem wird betont, dass die simulationsbasierte Lernumgebung ohne AR positive Effekte im Zusammenhang mit dem Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis demonstrierte. Ein Übertrag des Konzepts der Lernumgebung auf weitere Techniken ist daher auch denkbar (vgl. Probst et al., 2021).

Zwar demonstrierten die Befunde, dass AR lernförderlich sein kann, jedoch deckten die Untersuchungen eine neue Forschungslücke auf. In Hauptstudie 2 wurde die Wirkung des Treatments, d.h. die Bearbeitung der AR-Lernumgebung, auf das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis beforscht. Das Treatment zielte auf den Umgang mit augmentierten Repräsentationen und ihren Verknüpfungen ab. Effekte von AR können zwar im Gruppenvergleich auf das Treatment zurückgeführt werden, jedoch können keine eindeutigen Schlussfolgerungen auf Basis der Elaboration mit den verschiedenen AR-Objekten gezogen werden. Im Rahmen der vorliegenden

Forschungsarbeit wurde nicht erfasst, ob und wie mit den augmentierten (M)ER tatsächlich gearbeitet wurde. Aussagen darüber, ob, wie oft, zu welchem Zeitpunkt und wie lange diese genutzt wurden, können nicht getroffen werden. Es bleibt daher zu klären, wie die Lehrpersonen während der Arbeit mit der AR-Lernumgebung mit den AR-Objekten umgingen und ob sich Elaborationsprofile abbildeten. Entsprechend sollte die Elaboration mit den Lernumgebungen näher analysiert und hinsichtlich ihrer Wirksamkeit untereinander verglichen werden. Als Erhebungsmethode eignet sich nach wie vor das Laute Denken. Zusätzlich sollte die Aufzeichnung der Blickbewegungen einen tiefgehenden Einblick in das Elaborationsverhalten der Lehrpersonen, gegebenenfalls im Experten-Novizen-Vergleich, geben. Mittels mobilem Eye-Tracking könnte ermittelt werden, ob und wie lange die Lehrpersonen den verschiedenen (M)ER Aufmerksamkeit schenken und welche Wirkung AR auf den Umgang mit der chemischen Fachsprache hat (vgl. Fleischer et al., 2020; Buchner et al., 2021). Denkbar wäre es dann, dass die Protokolle des Lauten Denkens mithilfe der finalen Kategoriensysteme (vgl. Kapitel 12.1) sowie anschließender qualitativer Inhaltsanalyse nach Mayring (2010) ausgewertet und mit den Eye-Tracking-Daten kombiniert werden.

Ein weiterführendes, auf den vorliegenden Befunden aufbauendes Forschungsfeld wäre eine detaillierte und differenzierte Untersuchung der Wirksamkeit von AR bei Schülern. Mit dem Ziel Bildungsprozesse und Kompetenzentwicklungen mit technischen Innovationen bei Kindern und Jugendlichen zu stärken, sollten sich zukünftige Untersuchungen mit der Verwendung von augmentierten, chemischen Repräsentationsformen bei Schülern beschäftigen. In diesem Zusammenhang könnten sich unter Berücksichtigung kognitionspsychologischer Aspekte, Forschungen zum Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis bei Schülern anschließen. Es scheint sodann sinnvoll, die Lernumgebungen und Testaufgaben schülergerechter umzukonzeptionieren. Die Instruktionmethoden der Lernumgebung könnten zur Unterstützung kognitiver Modellierungsprozesse beim Stoff-Teilchen-Ebenenwechsel angepasst werden. Um das Lernen mit den verschiedenen augmentierten (M)ER bei Schülern zu erleichtern, könnten Prompting-Maßnahmen in das Setting implementiert werden (vgl. Bannert, 2009). Direkte und indirekte Prompts der AR-Lernumgebung sollten sich auf das Verständnis zum Umgang mit Stoff- und Teilchenebene auswirken (vgl. Renkl & Scheiter 2017). Überdies könnten gestützte Hilfen zur Minimierung des *Cognitive Loads* in die Lernumgebung integriert werden (Chandler & Sweller, 1991). Zudem wäre in diesem Kontext interessant zu untersuchen, wie lernförderlich AR für das naturwissenschaftliche Arbeiten per se ist. Das Konzept der Lernumgebungen dieser Dissertationsarbeit stützte sich auf einem standardisierten Lehrerdemonstrationsversuch, der bis auf das Anschalten der Gleichspannungsquelle und der Erhöhung bzw. Reduzierung der Spannung keine weiteren Eingriffe von außen erforderte. Infolgedessen könnte sich die Microscale-Variante zur Elektrolyse von Zinkiodid für den Einsatz bei Schülern eher

eignen, wenn die Lernenden den Versuch selbstständig aufbauen und mit Blick auf die Förderung der fachlichen und prozessbezogenen Kompetenzen AR-Hilfen, inklusive simultaner virtueller Teilchenmodellierungen, nutzen. Als zusätzliche Unterstützung bei der Bearbeitung der Testbearbeitungen könnte die Technik des Signaling integriert werden (Scheiter & Eitel, 2015; Seufert, 2003), sodass verwandte Elemente in Texten und Symbolen konkret betont werden. Anschlussforschungen auf Schülerebene könnten zudem das Vorwissen der Lernenden als Einflussgröße auf die Verwendung von AR-Repräsentationen fokussieren (vgl. Seufert, 2003).

14.2 Praxisrelevanz für die Schule sowie Lehreraus- und -weiterbildung

Der digitale Wandel schreitet in sämtlichen Lebensbereichen rasant voran und ist das „Mega-Thema“ im Bildungssektor (Martin et al., 2022; Petko et al., 2018). Aufgrund der Schnelllebigkeit technischer Entwicklungen sind digitale Medien als (epochaltypisches) Schlüsselproblem der Menschheit anzusehen (vgl. Klafki, 1998), wodurch die Institution Schule immer wieder vor neue Herausforderungen gestellt wird (vgl. Petko et al., 2018). Medienkompetenz wurde lange Zeit als ein Lernfeld angesehen, welches additiv zu bestehenden Kompetenzen der Fächer gelehrt werden sollte. Spätestens seit der Corona-Pandemie wurde deutlich, dass die Rolle digitaler Medien wesentlich weitreichender ist und über traditionelle Lernziele hinausgeht. Die Digitalisierung fordert demnach nicht nur den bloßen Medieneinsatz, vielmehr zieht sie Fragen an die Lehrinhalte aller Unterrichtsfächer nach sich und prägt infolgedessen die Organisation, Verwaltung und Struktur der Institution Schule (Heinen & Kerres, 2017). Entsprechend sollte der Fachunterricht hinsichtlich seiner Zielsetzungen, Inhalte und Methoden mit Blick auf die Lernförderlichkeit digitaler Medien transformiert werden. Er zielt sowohl auf die (teilweise) Automatisierung als auch auf die Verbesserung von Lehr- und Lernprozessen durch Technologien ab (Kammerl, 2018). Bildungsangebote mit dem Schwerpunkt der Digitalisierung sollten zum konsekutiven Kompetenzerwerb über die Klassenstufen und Schularten hinweg curricular vernetzt werden. Die digitale Unterrichtsentwicklung kann sich in den einzelnen Fächern sehr unterschiedlich gestalten (Henne et al., 2021). Die Bildungsstandards im Fach Chemie für den Mittleren Schulabschluss betonen das Zusammenspiel von naturwissenschaftlicher Erkenntnis und technischen Anwendungen (KMK, 2005). Eng verzahnt stehen Naturwissenschaft und Technik im Zentrum unserer gesellschaftlichen Entwicklungen, wenn es beispielsweise um die Neurowissenschaften, Umwelt- und Energietechnologie oder die Weiterentwicklung von Werkstoffen und Produktionsverfahren sowie die Nano- oder Informationstechnologie geht. Die naturwissenschaftliche Grundbildung umfasst das Beobachten, Beschreiben und Erklären chemischer Phänomene, indem die Sprache sowie Historie verstanden und Ergebnisse kommuniziert und analysiert werden. Mit Blick auf eine analytische und rationale Betrachtung der Welt müssen dabei Grenzen diskutiert und Gefahren kommuniziert werden (KMK, 2005). Die Veranschaulichung chemischer Sachverhalte und insbesondere die Modellierung von Teilchen-

prozessen stützt sich auf diversen Repräsentationen. Dabei sind es vor allem digitale Techniken, die unabdingbar zur Erklärung der stofflichen Welt geworden sind (Huwer et al., 2019; Nerdel & Kotzebue, 2020). Entsprechend können AR und VR zur Visualisierung hoch komplexer chemischer Vorgänge genutzt werden (Stolzenberger et al., 2019). Mittels digitaler Medien sowie ihren innovativen Varianten wie AR können Lernende unterstützt werden, sich kritisch mit dem Stoff-Teilchen-Ebenenwechsel zu beschäftigen, sodass kognitive Aktivitäten durch Rückgriff auf das Vorwissen angeregt werden können. Neben motivationalen Faktoren sind es pädagogische und kognitionspsychologische Aspekte, wie die Effektivität AR-basierter 3D-Darstellungen für das Training räumlicher Fähigkeiten (Buchner et al., 2021), die die Stärke von innovativen Technologien untermauern. Die Ergebnisse dieser Forschungsarbeit zeigen, dass digitale Lernumgebungen und insbesondere innovative AR-Lernszenarien von MINT-Lehrkräften erfolgsversprechend für den Fachunterricht angesehen werden und wirksam zur Förderung bestimmter Elaborationsprozesse sein können. Dabei wurden in Abhängigkeit von den Einstellungen hinsichtlich digitaler Medien, sowie der Systemqualität, Unterschiede in der Akzeptanz demonstriert. Überdies scheinen die unterschiedlichen Interaktionsmöglichkeiten mit den verschiedenen (non-) AR-Repräsentationsformen die Nutzungseffizienz zu beeinflussen (Ainsworth, 1999).

Es gehen große Erwartungen und Herausforderungen mit der technologischen Entwicklung in den Naturwissenschaften und der digitalen Bildung einher (Petko et al., 2018). Die Forschungsbefunde dieser Arbeit bestätigen, dass der bloße Einsatz digitaler Anwendungen nicht zwangsläufig zu verbesserten Lehr- und Lernprozessen führt. Neben „gängigeren“ Apps für das Tablet werden zwar innovative Lernumgebungen, wie jene auf der AR-Brille, vielversprechend für den Einsatz im Fachunterricht angesehen, jedoch sehen Lehrkräfte ein größeres Potential zur Vermittlung von Redoxreaktionen in Hinblick auf den Stoff-Teilchen-Ebenenwechsel in den Tablet-Varianten. Der Optimierungsbedarf der High-End-Technologie ist vor allem auf die Technik selbst (z.B. Leistung des Endgeräts wie Akkulaufzeit usw.) zurückzuführen. Auch die hohen Kosten erschweren aktuell noch die Aufgeschlossenheit der Lehrkräfte (vgl. Miesera et al., 2018). Dabei ist zu erwarten, dass der schnellvoranschreitende digitale Wandel nicht nur Herausforderungen aufdeckt, sondern mit Blick auf die Weiterentwicklung der Techniken zahlreiche Chancen bietet, die den Umgang mit digitalen Medien perspektivisch erleichtern und das „Eintauchen in virtuelle Welten“ normalisieren können. Trotz der motivationsfördernden Stärke von (HMD-) AR, wurde deren erfolgsversprechender Unterrichtseinsatz kritisch betrachtet. Zwar kann die Begeisterung für innovative Technologien wie AR hoch sein, diese werden aber nur dann angenommen und wahrscheinlich in Folge im Unterricht eingesetzt, wenn Lehrpersonen eine Lernförderlichkeit in ihnen erkennen. Kernelement der (digitalen) Unterrichtsgestaltung ist und bleibt damit die Fachdidaktik. Ihr liegt zwar eine Vielzahl an methodischen und medialen Möglichkeiten zugrunde, die Technologie per se kann aber das

Verständnis chemischer Konzepte, wie jenes zum Stoff-Teilchen-Ebenenwechsel, nicht gänzlich allein fördern. Es bedarf wie bisher in „klassischen“ (analogen) Formaten stets einer didaktischen Rahmung. Demzufolge sollten digitale Medien unterstützend, je nach Zweckdienlichkeit, für gewisse, aber keineswegs alle, Unterrichtssituationen eingesetzt werden. Technische Herausforderungen, die mit stark innovativen Settings wie mit der HMD-AR-Technologie einhergehen, bürden die zusätzliche Gefahr der kognitiven Überanstrengung (vgl. Peeters et al., 2023; Buchner et al., 2021). Sind die Lehrkräfte ungeübt im Umgang mit technischen Innovationen, benötigen sie einen großen Anteil der zur Verfügung stehenden Lernzeit dafür, die Steuerung mit dem Medium zu erlernen (vgl. Jeffels, 2011). Ein erhöhter *Extraneous Load*, basierend auf der Steuerung und Orientierung in der HMD-AR-Lernumgebung, kann dann für hohe kognitive Anstrengungen sorgen. Demnach sollten Lehrkräfte schon früh Erfahrung mit neuen digitalen Anwendungen sammeln. Sie können dann leichter das (nicht) vorhandene didaktische Potential wiedererkennen und die Innovationen als Lernwerkzeug effektiver und effizienter für den Unterricht nutzbar machen. Dies erhöht schließlich die Akzeptanz der neuartigen Anwendungen (Karapanos et al., 2018).

In diesem Kontext wird der Usability eine wichtige Rolle zugewiesen. Gewiss minimiert eine niedrige Usability den Lernerfolg. Inwiefern die hohe Systemqualität von innovativen Settings den Lernerfolg beeinflusst, sollte aber noch geklärt werden (Karapanos et al., 2018). Technologische Entwicklungen müssen sich nicht zwingend positiv auf den Lernerfolg auswirken (Buchner & Zumbach, 2020). Feststeht, dass AR als Lernmedium eine förderliche und motivierende Wirkung besitzen kann. Um das Potential bestmöglich auszuschöpfen, bedarf es einer hohen Usability. Die Lernumgebungen dieser Forschungsarbeit sollten daher in Hinblick auf die technische Bedienbarkeit optimiert werden. Mit Blick auf den *Cognitive Overload* ist es wichtig, den *Extraneous Load* gering zu halten (Sweller, 2011). Ferner sollte AR zur Nutzbarkeit beim Experimentieren auf weitere Versuchsreihen übertragen werden. Da mit der Etablierung neuer Technologien immer wieder neue Qualitäten erwartet werden (Buchner & Freisleben-Teutscher, 2020), könnten die Modifizierungen der in der Studie eingesetzten Lernumgebungen erste Weichen setzen, die Lernwirksamkeit zu erhöhen und Bildungsprozesse positiv zu beeinflussen.

Wie die Studienergebnisse dieser Forschungsarbeit demonstrieren, ist AR per se und als Lehr- und Lernwerkzeug sehr unbekannt. Aus motivationaler Perspektive scheinen innovative Anwendungen mit hohem Neuheitsgrad nur bei technisch-affinen Lehrkräften akzeptanzfördernd zu sein. Die Aufgeschlossenheit der Lehrpersonen aufgrund von Alter, Interesse usw. (vgl. Kapitel 9.1.1) kann unterschiedlich ausgeprägt sein. Mit der Vielzahl an (Neu-) Erscheinungen von technologischen Innovationen scheinen sehr viele Unsicherheiten geschürt zu werden (Kammerl, 2018). Der empirische Forschungsstand zu den Gelingensbedingungen digitaler Anwendungen zur Förderung digitaler Kompetenzen, sowie dem „neuen“ Professionswissen

von Lehrkräften, zeigt sich sehr heterogen und teils unzureichend erforscht (vgl. Kammerl, 2018). Aufgrund des Beschleunigungseffekts sind Lehrkräfte einem ständigen „Neuerlernen von Apps“ ausgesetzt, der eine stetige medienbezogene Kompetenzerweiterung fordert. Die Anzahl der technischen Neuheiten erscheint nicht nur unzählbar, innovative technologische Erneuerungen wie AR, VR oder Künstliche Intelligenz und ihre fortlaufenden Weiterentwicklungen bürgen wahrhaftig große Aufgaben, die das Lehrpersonal mit neuen Schwierigkeiten konfrontiert. Der digitale Unterricht sollte daher nicht nur den Einsatz der Technik selbst, sondern vor allem das fachdidaktische Potential digitaler Medien fokussieren. Laut Eickelmann et al. (2019) liegt Deutschland im Einsatz digitaler Unterrichtsszenarien zurück. Die Kluft zwischen digital erfahreneren und digital unerfahrenen Lehrpersonen („Digital Natives“ vs. „Digital Immigrants“) schließt sich kaum (vgl. Prensky, 2001). Zudem geht eine große Schwierigkeit mit der Qualität der bestehenden digitalen Lernanwendungen einher. Ausgereifte didaktische Konzepte für den digitalgestützten Fachunterricht sind bis dato nur in begrenzter und qualitativ eingeschränkter Anzahl verfügbar. Dabei ist anzumerken, dass die Geräteausstattung mit ihren entsprechenden Lehr- und Lern-Apps an den Schulen, bezogen auf fachdidaktische Unterrichtskonzepte, insgesamt noch sehr ausbaufähig ist (vgl. Miesera et al., 2018). Die Hochschule hat daher die Aufgabe innovative Technologien mit ihren Lehr- und Lernszenarien zu entwickeln und zu erforschen (Stolzenberger et al., 2019). Ihre Stärken und Schwächen müssen dann von den (angehenden) Lehrpersonen identifiziert und reflektiert im Unterricht implementiert werden. Dies gestaltet sich laut Stolzenberger et al. (2019) für Lehrpersonen nicht immer leicht. Daher steht die Professionalisierung von Lehrkräften im Zentrum der Digitalisierung von Schule und Unterricht. Buchner und Zumbach (2020) geben an, dass sich (angehende) Lehrkräfte bei der digitalen Unterrichtsgestaltung tendenziell weniger auf digitale Unterrichtsmaterialien und noch weniger auf innovative Lehr- und Lernszenarien wie die der AR konzentrieren. Entsprechend sollten die Aus-, Fort- und Weiterbildungen zu medienbezogenen Kompetenzen von Lehrkräften ausgebaut werden (Waffner, 2020). Das frühe und vermehrte Kennenlernen neuartiger Technologien, vorzugsweise bereits im Studium, kann (angehende) Lehrkräfte im Wissensaufbau um digitale Schul- und Unterrichtsentwicklungsprozesse unterstützen. Demnach sollte der geübte Umgang mit der Bedienbarkeit technologischer Innovationen die Einstellungen und Selbstwirksamkeit, sowie das tatsächliche technische Können steigern (Chittleborough, 2014). Nur wenn Lehrkräfte an technische Innovationen wie AR „sanft“ herangeführt werden, können unerfahrene und speziell „skeptische“ Lehrpersonen sensibilisiert werden Unterrichtskonzepte mit digitalen Medien und High-End-Technologien zu gestalten, analysieren und reflektiert im Fachunterricht einzusetzen. Folglich können Lehrkräfte mit einem hohen medienbezogenen Wissen im Kollegium als Multiplikatoren fungieren und beispielsweise im Rahmen schulinterner Lerngemeinschaften ihre Erfahrungen

zu innovativen Unterrichtsmaterialien mit anderen Lehrkräften teilen und dadurch zum reflexiven Dialog in der Schulgemeinschaft anregen. Es sollte eine Schulkultur entwickelt werden, in der das Lernen miteinander und voneinander zwischen den Lehrpersonen, sowie mit ihren Schülern wertgeschätzt wird (Seufert et al., 2018). Das experimentelle Ausprobieren von Neuem zeigt sich sehr risikobehaftet und forciert demzufolge Kontinuität und Verlässlichkeit, wenn es um die (Weiter-) Entwicklung gemeinsamer Wertemuster geht (Bonsen & Rolff, 2006). Zum einen sollten Schulen die nötigen technischen Ressourcen und einen IT-Support zur Verfügung stellen (Chittleborough, 2014; Schmid et al., 2017). Zum anderen müssen sie offen für neue Lernansätze sein, um innovative Lernumgebungen ebenso einfach wie traditionelle Lernmaterialien gemeinsam umsetzen zu können (Buchner & Zumbach, 2020). Überdies sollten Lehrkräfte über ausreichend Zeit zur Vorbereitung des digitalgestützten Unterrichts verfügen (Miesera et al., 2018), damit digitale Lehr- und Lernszenarien auch tatsächlich häufiger im Unterricht verwendet werden (Härtig et al., 2020).

Um die Aufgaben, die mit der Digitalisierung in Schule und Unterricht einhergehen, zu bewältigen, ist der Aufbau entsprechender Kapazitäten in Forschung und Lehre nötig. Es muss immer wieder neu geklärt werden, wie Lehrpersonen für die Zukunft auszubilden sind. Bezogen auf die zukünftigen Entwicklungen müssen im Zuge des Lehramtsstudiums neue Denkrichtungen angeregt werden, die nicht nur von der heutigen Situation ausgehen, sondern Szenarien für die Zukunft entwerfen (intergenerationelle und schulübergreifende Zukunftslabore) und aus dieser Perspektive heraus Entwicklungslinien designen (vgl. Seufert et al., 2018). Goertz und Baeßler (2018) schlagen vor, niedrighschwellige Angebote in *Digital Labs* in Hochschulen zu testen, die auch für Lehrpersonen im Schuldienst interessant sind. Curricula und Kompetenzprofile von Lehrpersonen sollten hinsichtlich dieser gravierenden Veränderungen überprüft werden und an die digitale Transformation auf Unterrichts- und Schulebene angepasst werden. Die bloße Integration einzelner Mediendidaktikkurse in Curricula bürgt die Gefahr, dass der Wissensaufbau im Professionswissen fragmentarisch erfolgt und Handlungskompetenzen nur schwer ausreifen können. Seufert et al. (2018) betonen die Notwendigkeit, die Kompetenzentwicklung von Lehrpersonen stärker mit Innovationsstrategien und Schulentwicklungsprozessen zu verbinden. Entsprechend können die vier Entwicklungsfelder für die Lehrerbildung 1) *Medienbezogene Vorerfahrungen, Überzeugungen und Einstellungen von Studierenden stärker einbeziehen*, 2) *Medienspezifische Themen verbindlich in allen Bereichen der Lehre verankern*, 3) *Innovative Medienpraktiken in der Lehre und in Praktika erlebbar machen und erproben*, 4) *Die Frage der Wirksamkeit und der Verbesserung von Lernkultur und Unterrichtsqualität zu einem zentralen Referenzpunkt machen* nach Petko et al. (2018) nicht nur bestätigt, sondern um den Aspekt der High-End-Technologien wie AR für den MINT-Unterricht erweitert werden. Nur wenn die Studierenden ein grundlegendes Fundament - nicht nur an naturwis-

senschaftlichen, sondern vor allem auch an medienbezogenen Kompetenzen - in ihrem Studium erlernen, und diese Bildungsfelder miteinander verknüpfen, kann die fachdidaktische Lehrerbildung den künftigen Unterricht positiv beeinflussen. Die Förderung im Umgang mit technischen Innovationen für den MINT-Unterricht sollte daher früh in der Lehramtsausbildung beginnen und analog zu klassischen Didaktik-Veranstaltungen Eingang in die fach- und medienpädagogischen Gesamtkonzepte der Bildungseinrichtungen erhalten (vgl. Blossfeld et al., 2018).

VIII VERZEICHNISSE

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1. Denken in Modellen am Beispiel des Atommodells nach Rutherford (erweitert und adaptiert von Steinbuch, 1977; orientiert an Holleman & Wiberg, 1995 und Riedel, 2010).....	8
Abbildung 2. Johnstone's Dreieck (angepasst an Johnstone, 1993, 2000; orientiert an Parchmann et al., 2010).....	14
Abbildung 3. Denken in den drei Ebenen nach Johnstone (1993, 2000) auf Grundlage des Operierens mit der repräsentativen Ebene; exemplarisch für Salpetersäure.	18
Abbildung 4. Kommunikative Ebenen im Fach Chemie (nach Pfeifer et al., 2002).....	29
Abbildung 5. Übersicht der Symbolarten für den Fachbereich Chemie (verändert nach Nerdel, 2017; Pfeifer et al., 2002 und Fleischer, 2018).	33
Abbildung 6. Multimediales Lernen exemplarisch für chemische Repräsentationen (angepasst nach Schnotz, 2005).	40
Abbildung 7. TPACK-Modell (orientiert an Harris & Hofer, 2011; in Anlehnung an Köhler & Mishra, 2009).....	54
Abbildung 8. Ausschnitt einer videobasierten Lernumgebung zur Versuchsdurchführung der Synthese von Natriumchlorid (nach Chemie interaktiv, o.D.).....	60
Abbildung 9. Virtuality Continuum, exemplarisch für den Chemieunterricht (angepasst nach Milgram & Kishino, 1994).....	62
Abbildung 10. Merge Cube mit AR-Ausschnitten zur Projektion von 3D-AR-Objekten in den Würfel der realen Umgebung (nach Backwinkel GmbH, 2023).	67
Abbildung 11. Arbeitsblattausschnitt mit AR-Hilfen (übernommen von Huwer et al., 2019).	68
Abbildung 12. Ausschnitt eines Posters zur Demonstration der EXBOX-Digital am Beispiel der Microscale-Elektrolyse von Zinkiodid (übernommen von Fleischer et al., 2020).	69
Abbildung 13. Ausschnitt der Atom Visualizer AR Core App zur Visualisierung des Bohrschen Atommodells am Beispiel Silizium (übernommen von Signal Garden Research, 2023).	69
Abbildung 14. Operationalisierung der Einstellungen zu digitalen Medien (Itemabkürzung E _{x_dig}) bzw. AR (Itemabkürzung E _{x_aug} ; blau markiert).....	91
Abbildung 15. Operationalisierung der Selbstwirksamkeitserwartungen zu digitalen Medien bzw. AR (Itemabkürzung SW _{x_dig}) bzw. AR (Itemabkürzung SW _{x_aug} ; blau markiert).....	94
Abbildung 16. Operationalisierung der Akzeptanz und Usability der AR-Lernumgebung zur Elektrolyse von Zinkiodid; Anzahl der Items einer Skala (N).	98
Abbildung 17. Modell zur Entwicklung einer AR-Lernumgebung für den Chemieunterricht hinsichtlich der vier Entwicklungsbereiche Förderschwerpunkt, Fachinhalt, Design und Usability.	104
Abbildung 18. Übersicht der Funktionenauswahl in der AR-Lernumgebung mit ihren vier Lernpfaden und zugehörigen Auswahlmöglichkeiten vor und nach Anschalten der Gleichspannungsquelle.	106
Abbildung 19. Versuchsaufbau in der realen Umgebung mit Ausschnitt des Lernpfads Chemische Reaktion der AR-Lernumgebung (beta-Version); zu sehen ist ein U-Rohr mit zwei darauf befestigten Graphitelektroden, welches zu 2/3 mit einer farblosen Zinkiodidlösung befüllt wurde. Die Elektroden sind mit der Gleichspannungsquelle, die bereits angeschaltet war, verbunden. An der rechten Elektrode zeigt	

sich eine Gelbfärbung: Das Tablet liefert die bildliche Darstellung der Reduktion (nach Anschalten der Gleichspannungsquelle).	109
Abbildung 20. Sicht durch das Tablet auf den Versuchsaufbau in der realen Umgebung nach Anklicken der Lernpfade zu den Prozessen auf Teilchenebene (Symbol); links: Diffusion vor Reaktionsbeginn und rechts: Elektrolyse während des Versuchsablaufs (selbsterstellte Abbildung).	110
Abbildung 21. Übersicht des finalen Fragebogens zur Erfassung der Akzeptanz und Usability mit seinen Subkonstrukten und (neuen) Zieldimensionen vor dem Hintergrund der Itemselektion und (Neu-) Skalierung; N bezeichnet die Anzahl der Items einer Skala.	129
Abbildung 22. Studiendesign von Hauptstudie 1 mit unabhängigen Variablen UV1/2 und abhängiger Variable(n) AV(2).	138
Abbildung 23. Übersicht der modifizierten Lernpfade mit Funktionenauswahl.	140
Abbildung 24. Sicht durch das Tablet mit der AR-Lernumgebung auf die reale Versuchsausrüstung; Ausschnitt des Lernpfads Versuchsaufbau mit geöffnetem Menü und Funktionsleiste des Lernpfads.	141
Abbildung 25. Ausschnitt aus dem Lernpfad Diffusion auf Teilchenebene (Bild) mit eingblendeter Super-Lupe.	143
Abbildung 26. Ausschnitt des Lernpfads Diffusion nach Anklicken des Infokastens.	144
Abbildung 27. Ausschnitt des Lernpfads Elektrolyse auf Teilchenebene (Bild) mit Teilchenbewegungen bei Reaktionsablauf und Button zur Geschwindigkeitsregulation.	145
Abbildung 28. Ausschnitt des Lernpfads Chemische Reaktion (Symbol) nach Anklicken aller Teil- und Gesamtgleichungen mit eingblendeten Teilchenprozessen.....	146
Abbildung 29. Abschlussaufgaben des Lernpfads zur Diffusion auf Teilchenebene.	148
Abbildung 30. Ausschnitt des Lernpfads Elektrolyse auf Teilchenebene der Simulation nach Anklicken des Hilfe-Buttons.	149
Abbildung 31. Ausschnitt des Lernpfads Elektrolyse auf Teilchenebene der HMD-AR-Lernumgebung nach Anklicken des Hilfe-Buttons.	149
Abbildung 32. Durchführung und Ablauf der Datenerhebung mit Fokus auf Hauptstudie 1: Erfassung der Personenmerkmale und Erfassung der Akzeptanz und Usability sowie Bearbeitung einer der drei Lernumgebungen.	151
Abbildung 33. Boxplot-Darstellung für die Hauptskala Einstellungen zu AR (gesamt: N = 122, Sim: N = 35, AR: N = 46, HMD-AR: N = 41) mit zwei Ausreißern (Box = 25 - 75 % Quartile, schwarzer Querbalken = Median).	163
Abbildung 34. Zusammenfassung der Mediatoranalysen zur Überprüfung des Zusammenhangs zwischen den Einstellungen zu AR und der Akzeptanz mittels Modell a) Mediator: Individualisierbarkeit, b) Mediator: Problemorientierte Didaktik und c) Mediator: Voraussichtlicher Lernerfolg; angegeben sind über den Pfeilen B (SE _B) sowie die zugehörigen Signifikanzniveaus mit *** $p < .001$, ** $p < .01$, * $p < .05$ und n.s. nicht signifikant.	171
Abbildung 35. Exemplarische MC-Aufgabe im gemischten (gebundenen und offenen) Antwortformat (vgl. Aufgabe 5 aus Posttest).	211
Abbildung 36. Exemplarische Testaufgabe im offenen Antwortformat (vgl. Aufgabe 2 aus Prätest).212	

Abbildung 37. Durchführung und Ablauf der Datenerhebung mit Fokus auf Hauptstudie 2: Erfassung des Stoff-Teilchen-Konzeptverständnisses und Umgangs mit (M)ER sowie Bearbeitung einer der drei Lernumgebungen.	219
Abbildung 38. Übersicht zur Auswertung der Protokolle des Lauten Denkens bezüglich des Stoff-Teilchen-Konzeptverständnisses und der chemischen Fachsprache.	221
Abbildung 39. Übersicht der relativen Statementhäufigkeiten in Prozent aus KAT 1 der AR- und Simulations-Gruppe (AR und Sim) zu Messzeitpunkt 1 und 2 für die Subkategorien von 1.1 Nennung von Wissen aus dem Gedächtnis mit ihrer Grundgesamtheit an Statements aus Prä- und Posttest ($N_{Prä} = 215$, $N_{Post} = 111$).	239
Abbildung 40. Übersicht der relativen Statementhäufigkeiten in Prozent aus KAT 1 der AR- und Simulations-Gruppe (AR und Sim) zu Messzeitpunkt 1 und 2 für die Subkategorien von 1.2 Suche nach Beziehungen mit ihrer Grundgesamtheit an Statements aus Prä- und Posttest ($N_{Prä} = 279$, $N_{Post} = 232$).	241
Abbildung 41. Übersicht der relativen Statementhäufigkeiten in Prozent aus KAT 1 der AR- und Simulations-Gruppe (AR und Sim) zu Messzeitpunkt 1 und 2 für die Subkategorien von 3.1.1 Paraphrasieren und 3.1.2 Herstellen von Beziehungen mit ihren Grundgesamtheiten an Statements aus Prä- und Posttest (3.1.1: $N_{Prä} = 240$, $N_{Post} = 180$ und 3.1.2: $N_{Prä} = 122$, $N_{Post} = 175$).	244
Abbildung 42. Übersicht der relativen Statementhäufigkeiten in Prozent aus KAT 1 der AR- und Simulations-Gruppe (AR und Sim) zu Messzeitpunkt 1 und 2 für die Subkategorien von 3.1.3 Lösungswege beschreiben mit ihrer Grundgesamtheit an Statements aus Prä- und Posttest ($N_{Prä} = 1382$, $N_{Post} = 1159$).	247
Abbildung 43. Übersicht der relativen Statementhäufigkeiten in Prozent aus KAT 1 der AR- und Simulations-Gruppe (AR und Sim) zu Messzeitpunkt 1 und 2 für die Subkategorien von 3.2 Schlussfolgerungen mit ihrer Grundgesamtheit an Statements aus Prä- und Posttest ($N_{Prä} = 504$, $N_{Post} = 490$).	251
Abbildung 44. Übersicht der relativen Statementhäufigkeiten in Prozent aus KAT 1 der AR- und Simulations-Gruppe (AR und Sim) zu Messzeitpunkt 1 und 2 für die Subkategorien von 4.2 Schwerpunktsetzungen mit ihrer Grundgesamtheit an Statements aus Prä- und Posttest ($N_{Prä} = 150$, $N_{Post} = 114$).	255
Abbildung 45. Übersicht der relativen Statementhäufigkeiten in Prozent aus KAT 1 der AR- und Simulations-Gruppe (AR und Sim) zu Messzeitpunkt 1 und 2 für die Subkategorien von 4.3 Detailreduktion mit ihrer Grundgesamtheit an Statements aus Prä- und Posttest ($N_{Prä} = 51$, $N_{Post} = 27$).	256
Abbildung 46. Übersicht der relativen Statementhäufigkeiten in Prozent aus KAT 2 der AR- und Simulations-Gruppe (AR und Sim) zu Messzeitpunkt 1 und 2 für die Subkategorien von 1.2 Suche nach Beziehungen mit ihrer Grundgesamtheit an Statements aus Prä- und Posttest ($N_{Prä} = 202$, $N_{Post} = 135$).	258
Abbildung 47. Übersicht der relativen Statementhäufigkeiten in Prozent aus KAT 2 der AR- und Simulations-Gruppe (AR und Sim) zu Messzeitpunkt 1 und 2 für die Subkategorien von 3.1.1 Paraphrasieren und 3.1.2 Herstellen von Beziehungen mit ihren Grundgesamtheiten an Statements aus Prä- und Posttest (Kategorie 3.1.1: $N_{Prä} = 185$, $N_{Post} = 119$ und 3.1.2: $N_{Prä} = 89$, $N_{Post} = 104$).	260

Abbildung 48. Übersicht der relativen Statementhäufigkeiten in Prozent aus KAT 2 der AR- und Simulations-Gruppe (AR und Sim) zu Messzeitpunkt 1 und 2 für die Subkategorien von 3.1.3 Lösungswege beschreiben mit ihrer Grundgesamtheit an Statements aus Prä- und Posttest ($N_{Prä} = 1020$, $N_{Post} = 1118$).	263
Abbildung 49. Prä-Post-Vergleich der Testbearbeitung von Proband 19 der AR-Gruppe am Beispiel der Ankeraufgabe zur Gewinnung von Blei aus Subkategorie 3.1.3.8 Lösungswege beschreiben: Text und Symbol anwenden.	265
Abbildung 50. Prä-Post-Vergleich der Testbearbeitung von Proband 10 der AR-Gruppe am Beispiel der Ankeraufgabe zur Galvanisierung aus Subkategorie 3.1.3.10 Lösungswege beschreiben: Text, Symbol und Bild anwenden.	266
Abbildung 51. Übersicht der relativen Statementhäufigkeiten in Prozent aus KAT 2 der AR- und Simulations-Gruppe (AR und Sim) zu Messzeitpunkt 1 und 2 für die Subkategorien von 3.2.1 Schlussfolgerungen mit ihrer Grundgesamtheit an Statements aus Prä- und Posttest ($N_{Prä} = 147$, $N_{Post} = 110$).	267
Abbildung 52. Übersicht der relativen Statementhäufigkeiten in Prozent aus KAT 2 der AR- und Simulations-Gruppe (AR und Sim) zu Messzeitpunkt 1 und 2 für die Subkategorien von 3.2.3 Diagnose eigener Fehler mit ihrer Grundgesamtheit an Statements aus Prä- und Posttest ($N_{Prä} = 21$, $N_{Post} = 28$).	268
Abbildung 53. Übersicht der relativen Statementhäufigkeiten in Prozent aus KAT 2 der AR- und Simulations-Gruppe (AR und Sim) zu Messzeitpunkt 1 und 2 für die Subkategorien von 4.1 Schwerpunktsetzungen mit ihrer Grundgesamtheit an Statements aus Prä- und Posttest ($N_{Prä} = 115$, $N_{Post} = 146$).	269
Abbildung 54. Übersicht der relativen Statementhäufigkeiten in Prozent aus KAT 2 der AR- und Simulations-Gruppe (AR und Sim) zu Messzeitpunkt 1 und 2 für die Subkategorien von 4.2 Detailreduktionen mit ihrer Grundgesamtheit an Statements aus Prä- und Posttest ($N_{Prä} = 44$, $N_{Post} = 12$).	270
Abbildung 55. Übersicht der relativen Statementhäufigkeiten in Prozent aus KAT 1 der AR- und HMD-AR-Gruppe (AR und HMD-AR) zu Messzeitpunkt 1 und 2 für die Subkategorien von 1.1 Nennung von Wissen aus dem Gedächtnis mit ihrer Grundgesamtheit an Statements aus Prä- und Posttest ($N_{Prä} = 221$, $N_{Post} = 123$).	273
Abbildung 56. Übersicht der relativen Statementhäufigkeiten in Prozent aus KAT 1 der AR- und HMD-AR-Gruppe (AR und HMD-AR) zu Messzeitpunkt 1 und 2 für die Subkategorien von 1.2 Suche nach Beziehungen mit ihrer Grundgesamtheit an Statements aus Prä- und Posttest ($N_{Prä} = 268$, $N_{Post} = 228$).	274
Abbildung 57. Übersicht der relativen Statementhäufigkeiten in Prozent aus KAT 1 der AR- und HMD-AR-Gruppe (AR und HMD-AR) zu Messzeitpunkt 1 und 2 für die Subkategorien von 3.1.1 Paraphrasieren und 3.1.2 Herstellen von Beziehungen mit ihrer Grundgesamtheit an Statements aus Prä- und Posttest (3.1.1: $N_{Prä} = 245$, $N_{Post} = 186$ und 3.1.2: $N_{Prä} = 156$, $N_{Post} = 213$).	276
Abbildung 58. Übersicht der relativen Statementhäufigkeiten in Prozent aus KAT 1 der AR- und HMD-AR-Gruppe (AR und HMD-AR) zu Messzeitpunkt 1 und 2 für die Subkategorien von 3.1.3 Lösungswege	

beschreiben mit ihrer Grundgesamtheit an Statements aus Prä- und Posttest ($N_{Prä} = 1493$, $N_{Post} = 1297$).	278
Abbildung 59. Übersicht der relativen Statementhäufigkeiten in Prozent aus KAT 1 der AR- und HMD-AR-Gruppe (AR und HMD-AR) zu Messzeitpunkt 1 und 2 für die Subkategorien von 3.2 Schlussfolgerungen mit ihrer Grundgesamtheit an Statements aus Prä- und Posttest ($N_{Prä} = 510$, $N_{Post} = 496$).	281
Abbildung 60. Übersicht der relativen Statementhäufigkeiten in Prozent aus KAT 1 der AR- und HMD-AR-Gruppe (AR und HMD-AR) zu Messzeitpunkt 1 und 2 für die Subkategorien von 4.2 Schwerpunktsetzungen mit ihrer Grundgesamtheit an Statements aus Prä- und Posttest ($N_{Prä} = 136$, $N_{Post} = 114$).	283
Abbildung 61. Übersicht der relativen Statementhäufigkeiten in Prozent aus KAT 2 der AR- und HMD-AR-Gruppe (AR und HMD-AR) zu Messzeitpunkt 1 und 2 für die Subkategorien von 1.2 Suche nach Beziehungen mit ihrer Grundgesamtheit an Statements aus Prä- und Posttest ($N_{Prä} = 179$, $N_{Post} = 128$).	286
Abbildung 62. Übersicht der relativen Statementhäufigkeiten in Prozent aus KAT 2 der AR- und HMD-AR-Gruppe (AR und HMD-AR) zu Messzeitpunkt 1 und 2 für die Subkategorien von 3.1 Paraphrasierungen mit ihrer Grundgesamtheit an Statements aus Prä- und Posttest ($N_{Prä} = 1349$, $N_{Post} = 1379$).	287
Abbildung 63. Übersicht der relativen Statementhäufigkeiten in Prozent aus KAT 2 der AR- und HMD-AR-Gruppe (AR und HMD-AR) zu Messzeitpunkt 1 und 2 für die Subkategorien von 3.1.3 Lösungswege beschreiben mit ihrer Grundgesamtheit an Statements aus Prä- und Posttest ($N_{Prä} = 1086$, $N_{Post} = 1129$).	289
Abbildung 64. Testbearbeitung von Proband 46 der HMD-AR-Gruppe am Beispiel von Aufgabe 1 des Prätests aus Subkategorie 3.1.3.8 Lösungswege beschreiben: Text und Symbol anwenden.	291
Abbildung 65. Prä-Post-Vergleich der Testbearbeitung von Proband 43 der HMD-AR-Gruppe am Beispiel der Ankeraufgabe zur Gewinnung von Blei aus Subkategorie 3.1.3.8 Lösungswege beschreiben: Text und Symbol anwenden.	292
Abbildung 66. Prä-Post-Vergleich der Testbearbeitung von Proband 52 am Beispiel der Ankeraufgabe zur Galvanisierung aus Subkategorie 3.1.3.10 Lösungswege beschreiben: Text, Symbol und Bild anwenden.	292
Abbildung 67. Übersicht der relativen Statementhäufigkeiten in Prozent aus KAT 2 der AR- und HMD-AR-Gruppe (AR und HMD-AR) zu Messzeitpunkt 1 und 2 für die Subkategorien von 3.2.1 Schlussfolgerungen mit ihrer Grundgesamtheit an Statements aus Prä- und Posttest ($N_{Prä} = 140$, $N_{Post} = 94$).	293
Abbildung 68. Übersicht der erreichten Punkteanzahlen in den Testbearbeitungen hinsichtlich des Fachwissens von Simulations-, AR- und HMD-AR-Gruppe im Prä- und Posttest mit M (SD).	299
Abbildung 69. Übersicht der erreichten Punkteanzahlen in den Testbearbeitungen hinsichtlich des Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis von Simulations-, AR- und HMD-AR-Gruppe im Prä- und Posttest mit M (SD).	300

Abbildung 70. Übersicht der erreichten Punkteanzahlen in den Testbearbeitungen hinsichtlich der chemischen Fachsprache von Simulations-, AR- und HMD-AR-Gruppe im Prä- und Posttest mit M (SD).
 301

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1. Veranschaulichung des Denkens in den drei Ebenen nach Johnstone (1993) in den Bildungsstandards anhand exemplarischer Textausschnitte (nach KMK, 2005).	21
Tabelle 2. Häufigkeitsverteilung der Probanden in ihre Tätigkeitsbereiche (N = 20).	87
Tabelle 3. Häufigkeitsverteilung der Probanden hinsichtlich ihres Studiums (N = 20).	87
Tabelle 4. Übersicht der Items zur Erfassung der Einstellungen hinsichtlich digitaler Medien (TPCK-E) mit ihren Quellen und deren Modifizierungen anhand je eines Beispielitems.	92
Tabelle 5. Übersicht der Items zur Erfassung der Einstellungen hinsichtlich digitaler Medien (TPK-E) mit ihren Quellen und deren Modifizierungen anhand je eines Beispielitems.	92
Tabelle 6. Übersicht der Items zur Erfassung der Einstellungen hinsichtlich digitaler Medien (Allg-E) mit ihren Quellen und deren Modifizierungen anhand je eines Beispielitems.	93
Tabelle 7. Übersicht der Items zur Erfassung der Selbstwirksamkeitserwartungen hinsichtlich digitaler Medien (TPCK-SW) mit ihren Quellen und deren Modifizierungen anhand je eines Beispielitems.	95
Tabelle 8. Übersicht der Items zur Erfassung der Selbstwirksamkeitserwartungen hinsichtlich digitaler Medien (TPK-SW) mit ihren Quellen und deren Modifizierungen anhand je eines Beispielitems.	95
Tabelle 9. Item-Übersicht der Skala Akzeptanz mit Quelle und Modifizierung.	99
Tabelle 10. Item-Übersicht der Subskala Didaktische Gestaltungskriterien der Usability mit den Dimensionen Zielexplication, Angemessenheit der Anforderungen, Individualisierbarkeit und Problemorientierte Didaktik mit Quelle und Modifizierung.	100
Tabelle 11. Item-Übersicht der Subskala Mediendidaktische Gestaltungskriterien der Usability mit den Dimensionen Steuerbarkeit, Selbsterklärungsfähigkeit, Erwartungskonformität, Verständlichkeit und Wirkung der Medien mit Quelle und Modifizierung.	101
Tabelle 12. Item-Übersicht der Subskala Didaktik: Lernprozess der Usability mit den Dimensionen Voraussichtliche Motivation und Voraussichtlicher Lernerfolg mit Quelle und Modifizierung.	102
Tabelle 13. Übersicht der Items aus der Skala Einstellungen hinsichtlich digitaler Medien unter Angabe der Probandenanzahl (N), des Mittelwerts (M), der Standardabweichung (SD), der Trennschärfe (r_{it}) und der Reliabilität (α).	119
Tabelle 14. Übersicht der Items aus der Skala Einstellungen hinsichtlich AR unter Angabe der Probandenanzahl (N), des Mittelwerts (M), der Standardabweichung (SD), der Trennschärfe (r_{it}) und der Reliabilität (α).	120
Tabelle 15. Übersicht der Items aus der Skala Selbstwirksamkeit hinsichtlich digitaler Medien unter Angabe der Probandenanzahl (N), des Mittelwerts (M), der Standardabweichung (SD), der Trennschärfe (r_{it}) und der Reliabilität (α).	121
Tabelle 16. Übersicht der Items aus der Skala Selbstwirksamkeit hinsichtlich AR unter Angabe der Probandenanzahl (N), des Mittelwerts (M), der Standardabweichung (SD), der Trennschärfe (r_{it}) und der Reliabilität (α).	121

Tabelle 17. Übersicht der Items aus der Skala Akzeptanz unter Angabe der Probandenanzahl (N), des Mittelwerts (M), der Standardabweichung (SD), der Trennschärfe (r_{it}) und der Reliabilität (α).....	123
Tabelle 18. Übersicht der Items aus den Subskalen zur Usability – Didaktische Gestaltungskriterien unter Angabe der Probandenanzahl (N), des Mittelwerts (M), der Standardabweichung (SD), der Trennschärfe (r_{it}) und der Reliabilität (α).....	124
Tabelle 19. Übersicht der Items aus den Subskalen zur Usability – Funktionale Gestaltungskriterien unter Angabe der Probandenanzahl (N), des Mittelwerts (M), der Standardabweichung (SD), der Trennschärfe (r_{it}) und der Reliabilität (α).....	125
Tabelle 20. Übersicht der Items aus den Subskalen zur Usability – Mediendidaktische Gestaltungskriterien unter Angabe der Probandenanzahl (N), des Mittelwerts (M), der Standardabweichung (SD), der Trennschärfe (r_{it}) und der Reliabilität (α).....	126
Tabelle 21. Übersicht der Items aus den Subskalen zur Usability – Didaktik Schultransfer unter Angabe der Probandenanzahl (N), des Mittelwerts (M), der Standardabweichung (SD), der Trennschärfe (r_{it}) und der Reliabilität (α).	127
Tabelle 22. Häufigkeitsverteilung der Lehrkräfte hinsichtlich ihrer Standorte in Hauptstudie 1 (Befragung 1: N =148, Befragung 2: N = 107).	136
Tabelle 23. Häufigkeitsverteilung der Lehrkräfte hinsichtlich ihrer Unterrichtsfächer in Hauptstudie 1 (Befragung 1: N = 148, Befragung 2: N = 107); Mehrfachnennung möglich.....	137
Tabelle 24. Höhe von r (und r_s) zur Angabe der Zusammenhangsstärke nach Kuckartz et al. (2013).	152
Tabelle 25. Skalendokumentation des Erhebungsinstruments zu den Personenmerkmalen (Einstellungen) mit vierstufiger Likert-Skala (0: „stimme gar nicht zu“ bis 3: „stimme voll zu“) in Hauptstudie 1 unter Angabe der Probandenanzahl (N), Itemanzahl pro Skala (n), Cronbachs Alpha, wenn Item weggelassen (α), Mittelwert (M), Median (Mdn) und Standardabweichung (SD).	159
Tabelle 26. Skalendokumentation des Erhebungsinstruments zu den Personenmerkmalen (Selbstwirksamkeit) mit vierstufiger Likert-Skala (0: „stimme gar nicht zu“ bis 3: „stimme voll zu“) in Hauptstudie 1 unter Angabe der Probandenanzahl (N), Itemanzahl pro Skala (n), Cronbachs Alpha, wenn Item weggelassen (α), Spearman-Brown-Koeffizienten (r^{*}), Mittelwert (M), Median (Mdn) und Standardabweichung (SD).	159
Tabelle 27. Skalendokumentation des Akzeptanz- und Usability-Tests mit vierstufiger Likert-Skala (0: „stimme gar nicht zu“ bis 3: „stimme voll zu“) in Hauptstudie 1 unter Angabe der Probandenanzahl (N), Itemanzahl pro Skala (n), Cronbachs Alpha, wenn Item weggelassen (α), Mittelwert (M), Median (Mdn) und Standardabweichung (SD).	160
Tabelle 28. Deskriptive Statistik des Akzeptanz- und Usability-Tests mit vierstufiger Likert-Skala (0: „stimme gar nicht zu“ bis 3: „stimme voll zu“) in Hauptstudie 1 im Gruppenvergleich mit Simulation (N = 35), AR (N = 46) und HMD-AR (N = 41) unter Angabe des Mittelwerts (M), Medians (Mdn) und der Standardabweichung (SD).	161
Tabelle 29. Bivariate Korrelationen zwischen der Skala Akzeptanz bzw. Usability und den Hauptskalen zu Einstellungen hinsichtlich digitaler Medien und AR (abgekürzt: Gesamt), einschließlich der Subskalen zu TPACK (N = 115).....	164

Tabelle 30. Bivariate Korrelationen zwischen der Skala Akzeptanz bzw. Usability und den Hauptskalen zu Selbstwirksamkeitserwartungen hinsichtlich digitaler Medien und AR (abgekürzt: Gesamt), einschließlich der Subskalen zu TPACK (N = 115).....	165
Tabelle 31. Korrelation der acht Usability-Skalen mit der Akzeptanz-Skala (N = 122).....	166
Tabelle 32. Regressionsanalyse (stepwise) für die Akzeptanz als Kriteriumsvariable und die Einstellungen zu digitalen Medien und AR als Prädiktorvariablen (N = 122).....	167
Tabelle 33. Regressionsanalyse (stepwise) für die Akzeptanz als Kriteriumsvariable und ausgewählte Merkmale der Lernumgebung als Prädiktorvariablen (N = 122).....	168
Tabelle 34. Regressionsanalyse (stepwise) für die Individualisierung als Kriteriumsvariable und die Einstellungen zu digitalen Medien und AR als Prädiktorvariablen (N = 122).....	168
Tabelle 35. Regressionsanalyse (stepwise) für die problemorientierte Didaktik als Kriteriumsvariable und die Einstellungen zu digitalen Medien und AR als Prädiktorvariablen (N = 122).....	169
Tabelle 36. Regressionsanalyse (stepwise) für die Wirkung der Medien als Kriteriumsvariable und die Einstellungen zu digitalen Medien und AR als Prädiktorvariablen (N = 122).....	169
Tabelle 37. Regressionsanalyse (stepwise) für die voraussichtliche Motivation als Kriteriumsvariable und die Einstellungen zu digitalen Medien und AR als Prädiktorvariablen (N = 122).....	169
Tabelle 38. Regressionsanalyse (stepwise) für den voraussichtlichen Lernerfolg als Kriteriumsvariable und die Einstellungen zu digitalen Medien und AR als Prädiktorvariablen (N = 122).....	169
Tabelle 39. Regressionsanalyse (stepwise) für die Akzeptanz als Kriteriumsvariable und die Einstellungen zu AR, problemorientierte Didaktik, den voraussichtlichen Lernerfolg und die Individualisierbarkeit als Prädiktorvariablen (N = 122).....	170
Tabelle 40. Deskriptive Statistik der drei Gruppen Simulation, AR und HMD-AR auf die Akzeptanz mit Stichprobengrößen (N), adjustierten sowie unadjustierten Mittelwerten (M) und Standardabweichungen (SD).....	174
Tabelle 41. Paarweiser Vergleich der Gruppen Simulation, AR und HMD-AR für die Variable Akzeptanz nach Bereinigung der Usability-Variablen; Mittelwertdifferenzen (M_{Diff}), Standardabweichungen (SD), Signifikanzniveaus (p) sowie Unter- und Obergrenzen des 95 %-Konfidenzintervalls (95 %-CI).....	174
Tabelle 42. Varianzanalytischer Gruppenvergleich mit den Gruppen Simulation (N = 35), AR (N = 46) und HMD-AR (N = 41) für die Usability-Variablen unter Angabe der Mittelwerte (M), Standardabweichungen (SD), F-Wert (F), Freiheitsgrade (df), Signifikanzniveaus (p) und der Effektstärke (f).....	175
Tabelle 43. Studiendesign 1; UV ₁ Mediale und instruktionale Gestaltung der Lernumgebung sowie den erwarteten Effekten auf AV Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis.....	205
Tabelle 44. Studiendesign 2 mit UV ₂ Interaktivität der Lernumgebung sowie den erwarteten Effekten auf AV Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis.....	206
Tabelle 45. Übersicht der Aufgabenzuordnung in Prä- und Posttest bezüglich Art, Fachinhalt, Repräsentationswechsel ausgehend von Stoffebene (S) und/oder Teilchenebene (T) und Ankeraufgabe.....	207
Tabelle 46. Deduktive Kategorienentwicklung von KAT 1 zur Stoff- und Teilchenebene, exemplarisch demonstriert an Kategorie 3.1. Inferenzen, die dem Aufbau einer Textbasis oder visuellen Vorstellung	

(nach Schnotz, 2001) dienen unter Berücksichtigung der ursprünglichen und neuen Kategorie sowie der vorgenommenen Änderungen.	225
Tabelle 47. Deduktive Kategorienentwicklung von KAT 2 zum Umgang mit (M)ER, exemplarisch demonstriert an Kategorie 3.1. Inferenzen, die dem Aufbau einer Textbasis oder visuellen Vorstellung (nach Schnotz, 2001) dienen unter Berücksichtigung der ursprünglichen und neuen Kategorie sowie der vorgenommenen Änderungen.	226
Tabelle 48. Übersicht der Haupt- und Unterkategorien von KAT 1 zum Umgang mit der Stoff- und Teilchenebene mit ihren induktiven Kategorienentwicklungen und abschließenden Anzahlen an Subkategorien.	231
Tabelle 49. Ankerbeispiele von Hauptkategorie 1 Hinzufügen von Wissens-elementen durch Abruf zugehörigen Wissens aus dem Gedächtnis (Kat 1).	232
Tabelle 50. Ankerbeispiel von Hauptkategorie 2 Vergeblicher Abruf von Vorwissen/Information aus dem Gedächtnis (KAT 1).	232
Tabelle 51. Ankerbeispiele von Hauptkategorie 3 Hinzufügen von Wissen durch Wissenserzeugung mittels (logischer) Inferenzen (KAT 1).	233
Tabelle 52. Ankerbeispiele von Hauptkategorie 4 Reduktion von Detailwissen durch Streichung (KAT 1).	233
Tabelle 53. Ankerbeispiel von Hauptkategorie 5 Oberflächenelaboration (KAT 1).	234
Tabelle 54. Ankerbeispiele von Hauptkategorie 6 Monitoring Statements (KAT 1).	234
Tabelle 55. Ankerbeispiele von Hauptkategorie 7 Restkategorie (KAT 1).	235
Tabelle 56. Übersicht der Haupt- und Unterkategorien von KAT 2 zum Umgang mit (M)ER mit ihren induktiven Kategorienentwicklungen und abschließenden Anzahlen an Subkategorien.	236
Tabelle 57. Ankerbeispiele von Hauptkategorie 1 Hinzufügen von Wissens-elementen durch Abruf zugehörigen Wissens aus dem Gedächtnis (KAT 2).	237
Tabelle 58. Ankerbeispiele von Hauptkategorie 3 Hinzufügen von Wissen durch Wissenserzeugung mittels (logischer) Inferenzen (KAT 2).	237
Tabelle 59. Ankerbeispiele von Hauptkategorie 4 Reduktion von Detailwissen durch Streichung (KAT 2).	238
Tabelle 60. Ausgewählte Ankerbeispiele von Proband 22 der Simulations-Gruppe und Proband 3 der AR-Gruppe des Prätests aus Subkategorie 1.1.3.1 Inhalte auf Teilchenebene zu Messzeitpunkt 1 und 2.	240
Tabelle 61. Prä-Post-Vergleich mit ausgewählten Ankerbeispielen von Proband 6 der AR-Gruppe aus Subkategorie 1.2.1 Suche nach Beziehungen auf Teilchenebene.	241
Tabelle 62. Prä-Post-Vergleich mit ausgewählten Ankerbeispielen von Proband 11 der AR-Gruppe aus Subkategorie 1.2.2 Suche nach Beziehungen auf Stoffebene.	242
Tabelle 63. Prä-Post-Vergleich in der Grundgesamtheit mit ausgewählten Ankerbeispielen von Proband 15 und Proband 3 der AR-Gruppe aus Subkategorie 1.2.3.2 Suche nach Beziehungen mit dem Vorwissen auf Teilchenebene.	243
Tabelle 64. Prä-Post-Vergleich in der Grundgesamtheit mit ausgewählten Ankerbeispielen von Proband 11 der AR-Gruppe und Proband 40 der Simulations-Gruppe aus Kategorie 2 Vergeblicher Abruf von Vorwissen/Information aus dem Gedächtnis.	244

Tabelle 65. Prä-Post-Vergleich mit ausgewählten Ankerbeispielen von Proband 3 der AR- und Proband 22 der Simulations-Gruppe aus Subkategorie 3.1.1.1 Paraphrasieren auf Teilchenebene.....	245
Tabelle 66. Ausgewähltes Ankerbeispiel des Prätests von Proband 12 der AR-Gruppe aus Subkategorie 3.1.2 Herstellen von Beziehungen zwischen Stoff- und Teilchenebene.	246
Tabelle 67. Ausgewähltes Ankerbeispiel des Prätests von Proband 4 der AR-Gruppe aus Subkategorie 3.1.2 Herstellen von Beziehungen zwischen Stoff- und Teilchenebene.	246
Tabelle 68. Ausgewähltes Ankerbeispiel des Posttests von Proband 4 der AR-Gruppe aus Subkategorie 3.1.2 Herstellen von Beziehungen zwischen Stoff- und Teilchenebene.	246
Tabelle 69. Prä-Post-Vergleich mit ausgewählten Ankerbeispielen von Proband 3 der AR- und Proband 22 der Simulations-Gruppe aus Subkategorie 3.1.3.1 Teilchenebene wählen.	247
Tabelle 70. Ausgewähltes Ankerbeispiel des Posttests von Proband 14 der AR-Gruppe aus Subkategorie 3.1.3.2 Lösungswege beschreiben: Stoffebene wählen.	248
Tabelle 71. Ausgewähltes Ankerbeispiel des Prätests von Proband 21 der Simulations-Gruppe aus Subkategorie 3.1.3.3 Lösungswege beschreiben: Teilchenebene anwenden.....	249
Tabelle 72. Ausgewähltes Ankerbeispiel des Posttests von Proband 21 der AR-Gruppe aus Subkategorie 3.1.3.3 Lösungswege beschreiben: Teilchenebene anwenden.....	249
Tabelle 73. Prä-Post-Vergleich mit ausgewählten Ankerbeispielen von Proband 4 der AR-Gruppe aus Subkategorie 3.1.3.4 Lösungswege beschreiben: Stoffebene.	250
Tabelle 74. Ausgewähltes Ankerbeispiel des Prätests von Proband 11 der AR-Gruppe aus Subkategorie 3.1.3.5 Lösungswege beschreiben: Stoff- und Teilchenebene anwenden.	250
Tabelle 75. Ausgewähltes Ankerbeispiel des Prätests von Proband 23 der Simulations-Gruppe aus Subkategorie 3.2.1.1 Schlussfolgern auf Teilchenebene.....	252
Tabelle 76. Ausgewählte Ankerbeispiele des Posttests von Proband 15 der AR-Gruppe und Proband 21 der Simulations-Gruppe aus Subkategorie 3.2.1.2 Schlussfolgern auf Stoffebene.	253
Tabelle 77. Prä-Post-Vergleich mit ausgewählten Ankerbeispielen von Proband 5 der AR-Gruppe aus Subkategorie 3.2.2 Ergebnis nennen.	253
Tabelle 78. Prä-Post-Vergleich in der Grundgesamtheit mit ausgewählten Ankerbeispielen von Proband 15 und Proband 2 der AR-Gruppe aus Subkategorie 3.2.3 Inhaltliche Frage an sich selbst.	253
Tabelle 79. Ausgewähltes Ankerbeispiel des Prätests von Proband 4 der AR-Gruppe aus Subkategorie 4.2.3 Schwerpunktsetzung Stoff-Teilchen-Ebenenwechsel.	256
Tabelle 80. Ausgewähltes Ankerbeispiel des Posttests von Proband 8 der AR-Gruppe aus Subkategorie 4.2.3 Schwerpunktsetzung Stoff-Teilchen-Ebenenwechsel.	256
Tabelle 81. Ausgewähltes Ankerbeispiel des Prätests von Proband 25 der Simulations-Gruppe aus Subkategorie 1.2.1 Suche nach Beziehungen mit dem Text.	259
Tabelle 82. Ausgewähltes Ankerbeispiel des Posttests von Proband 20 der AR-Gruppe aus Subkategorie 1.2.1 Suche nach Beziehungen mit dem Text.	259
Tabelle 83. Prä-Post-Vergleich mit ausgewählten Ankerbeispielen von Proband 33 der Simulations-Gruppe aus Subkategorie 3.1.1.1 Paraphrasierungen aus Text in Text.....	261
Tabelle 84. Prä-Post-Vergleich mit ausgewählten Ankerbeispielen von Proband 4 der AR-Gruppe aus Subkategorie 3.1.1.4 Paraphrasierungen von Symbol in Text.....	261

Tabelle 85. Prä-Post-Vergleich mit ausgewählten Ankerbeispielen von Proband 4 der AR-Gruppe aus Subkategorie 3.1.2 Herstellen von Beziehungen zwischen Text und Symbol.	262
Tabelle 86. Prä-Post-Vergleich mit ausgewählten Ankerbeispielen von Proband 3 der AR-Gruppe aus Subkategorie 3.1.3.1 Text wählen.	263
Tabelle 87. Ausgewähltes Ankerbeispiel des Prättests von Proband 3 der AR-Gruppe aus Subkategorie 3.1.3.1 Lösungswege beschreiben: Text und Symbol wählen.	264
Tabelle 88. Prä-Post-Vergleich mit ausgewählten Ankerbeispielen von Proband 4 der AR-Gruppe aus Subkategorie 3.1.1.8 Text-Symbol anwenden.	265
Tabelle 89. Prä-Post-Vergleich mit ausgewählten Ankerbeispielen von Proband 11 der AR-Gruppe aus Subkategorie 3.2.1.1 Schlussfolgern mit Text.	267
Tabelle 90. Prä-Post-Vergleich mit ausgewählten Ankerbeispielen von Proband 11 der AR-Gruppe aus Subkategorie 3.2.1.2 Schlussfolgern mit Symbol.	268
Tabelle 91. Ausgewähltes Ankerbeispiel des Posttests von Proband 11 der AR-Gruppe aus Subkategorie 3.2.3.1 Diagnosen eigener Fehler mittels Text.	269
Tabelle 92. Prä-Post-Vergleich mit ausgewählten Ankerbeispielen von Proband 44 der HMD-AR-Gruppe aus Subkategorie 1.2.3.2 Suche nach Beziehungen mit dem Vorwissen auf Teilchenebene.	274
Tabelle 93. Ausgewählte Ankerbeispiele von Proband 50 und Proband 46 der HMD-AR-Gruppe zur Demonstration missglückter und erfolgreicher Ebenentrennungen aus Subkategorie 3.1.1.2 Paraphrasierungen auf Stoffebene.	276
Tabelle 94. Ausgewähltes Ankerbeispiel des Posttests von Proband 54 der HMD-AR-Gruppe aus Subkategorie 3.1.1.2 Paraphrasierung von Repräsentationsform auf Stoffebene.	277
Tabelle 95. Ausgewähltes Ankerbeispiel des Prättests von Proband 42 der HMD-AR-Gruppe aus Subkategorie 3.1.2 Herstellen von Beziehungen zwischen Stoff- und Teilchenebene.	277
Tabelle 96. Ausgewähltes Ankerbeispiel des Posttests von Proband 45 der HMD-AR-Gruppe aus Subkategorie 3.1.2 Herstellen von Beziehungen zwischen Stoff- und Teilchenebene.	278
Tabelle 97. Ausgewähltes Ankerbeispiel des Posttests von Proband 41 der HMD-AR-Gruppe aus Subkategorie 3.1.3.2 Lösungswege beschreiben: Teilchenebene wählen.	279
Tabelle 98. Prä-Post-Vergleich mit ausgewählten Ankerbeispielen von Proband 41 der HMD-AR-Gruppe aus Subkategorie 3.1.3.4 Stoffebene anwenden.	280
Tabelle 99. Ausgewähltes Ankerbeispiel des Posttests von Proband 55 der HMD-AR-Gruppe aus Subkategorie 3.3.4.3 Inhaltliche Bewertung der Stoff-Teilchen-Ebenenwechsel.	280
Tabelle 100. Prä-Post-Vergleich mit ausgewählten Ankerbeispielen von Proband 42 der HMD-AR-Gruppe aus Subkategorie 3.2.2 Ergebnis nennen.	282
Tabelle 101. Ausgewähltes Ankerbeispiel des Posttests von Proband 56 der HMD-AR-Gruppe aus Kategorie 4.1 Zieldefinitionen.	283
Tabelle 102. Ausgewähltes Ankerbeispiel des Posttests von Proband 45 der HMD-AR-Gruppe aus Subkategorie 4.2.1 Schwerpunktsetzung Teilchenebene.	283
Tabelle 103. Prä-Post-Vergleich mit ausgewählten Ankerbeispielen von Proband 47 der HMD-AR-Gruppe aus Subkategorie 4.2.2 Schwerpunktsetzung Stoffebene.	284

Tabelle 104. Ausgewähltes Ankerbeispiel des Posttests von Proband 45 der HMD-AR-Gruppe aus Subkategorie 1.2.2 Suche nach Beziehungen mit dem Symbol.	286
Tabelle 105. Ausgewähltes Ankerbeispiel des Prätests von Proband 46 der HMD-AR-Gruppe aus Subkategorie 3.1.2 Herstellen von Beziehungen zwischen Text und Symbol.	288
Tabelle 106. Ausgewähltes Ankerbeispiel des Posttests von Proband 44 der HMD-AR-Gruppe aus Subkategorie 3.1.2 Herstellen von Beziehungen zwischen Text und Symbol.	288
Tabelle 107. Prä-Post-Vergleich mit ausgewählten Ankerbeispielen von Proband 43 der HMD-AR-Gruppe aus Subkategorie 3.1.3.1 Lösungswege beschreiben: Text wählen.	290
Tabelle 108. Ausgewähltes Ankerbeispiel des Posttests von Proband 41 der HMD-AR-Gruppe aus Subkategorie 3.1.3.4 Lösungswege beschreiben: Text anwenden.	290
Tabelle 109. Ausgewähltes Ankerbeispiel des Prätests von Proband 41 der HMD-AR-Gruppe aus Subkategorie 3.1.3.8 Lösungswege beschreiben: Text und Symbol anwenden.	291
Tabelle 110. Ausgewähltes Ankerbeispiel des Prätests von Proband 47 der HMD-AR-Gruppe aus Subkategorie 3.1.3.10 Lösungswege beschreiben: Text, Symbol und Bild anwenden.	293
Tabelle 111. Prä-Post-Vergleich mit ausgewählten Ankerbeispielen von Proband 41 der HMD-AR-Gruppe aus Subkategorie 3.2.1.1 Schlussfolgern mit Text.	294
Tabelle 112. Ausgewähltes Ankerbeispiel des Posttests von Proband 47 der HMD-AR-Gruppe aus Subkategorie 3.2.1.3.2 Diagnose eigener Fehler mittels Symbol.	295
Tabelle 113. Ausgewähltes Ankerbeispiel des Posttests von Proband 43 der HMD-AR-Gruppe aus Subkategorie 4.2.3 Schwerpunktsetzung Text und Symbol.	295
Tabelle 114. Bewertungen der Testbearbeitungen mittels Punktevergabe von Simulations-, AR- und HMD-AR-Gruppe im Prä- und Posttest mit den Variablen Fachwissen, Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis und Chemische Fachsprache.	298

Literaturverzeichnis

- Ainsworth, S. E. (1999). The functions of multiple representations. *Computers and Education*, 33(2-3), 131–152.
- Ainsworth, S. E. (2006). DeFT: A conceptual framework for considering learning with multiple representations. *Learning and Instruction*, 16, 183–198.
- Ainsworth, S. E. (2014). The Multiple Representations Principle in Multimedia Learning. In R. E. Mayer (Hrsg.), *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning* (2. Aufl., S. 158–170). Cambridge University Press.
- Akademie für Lehrerfortbildung und Personalführung (ALP), Dillingen. (2014). *Chemie? - Aber sicher! Experimente kennen und können!* (Akademiebericht Nr. 475).
- Akçayır, M. & Akçayır, G. (2017). Advantages and challenges associated with augmented reality for education: A systematic review of the literature. *Educational Research Review*, 20, 1–11.

- Al-Balushi, S. M. & Al-Hajri, S. H. (2014). Associating animations with concrete models to enhance students' comprehension of different visual representations in organic chemistry. *Chemistry Education Research and Practice*, 15(1), 7–58.
- Alenezi, D. F. (2008). *A Study of Learning Mathematics Related to some Cognitive Factors and to Attitudes* [Dissertation]. University of Glasgow, Glasgow.
- Altmeyer, K., Kapp, S., Thees, M., Malone, S., Kuhn, J. & Brünken, R. (2020). The use of augmented reality to foster conceptual knowledge acquisition in STEM laboratory courses—Theoretical background and empirical results. *British Journal of Educational Technology*, 51(3), 611–628.
- Anderson, J. R. (1995). *Kognitive Psychologie* (2. Aufl.). Spektrum.
- Anderson, M. & Anderson, S. L. (2019). How Should AI Be Developed, Validated, and Implemented in Patient Care? *AMA journal of ethics*, 21(2), 125-130.
<https://doi.org/10.1001/amajethics.2019.125>.
- Anton, M. A. (2002). *Was können SchülerInnen im experimentellen Chemieunterricht lernen und was nicht?*
- Arbeitsgruppe Digitale Basiskompetenzen: Becker, S., Bruckermann, T., Finger, A., Huwer, J., Kremser, E., Meier, M., Thoms, L., Thyssen, C. & Kotzebue, L. von (2020). Orientierungsrahmen Digitale Kompetenzen für das Lehramt in den Naturwissenschaften – DiKoLAN. *Digitale Basiskompetenzen–Orientierungshilfe und Praxisbeispiele für die universitäre Lehr-amtsausbildung in den Naturwissenschaften*, 14–43.
- Atkinson, R. C. & Shiffrin, R. M. (1971). The control of short-term memory. *Scientific American*, 225(2), 82–90.
- Aufenanger, S. & Bastian, J. (2019). Einsatz digitaler Technologien in Studien. *Science Policy Paper*, 5, 39–44.
- Ayres, P. & Sweller, J. (2021). The Split-Attention Principle in Multimedia Learning. In R. E. Mayer & L. Fiorella (Hrsg.), *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning* (S. 199–211). Cambridge University Press.
- Azuma, R. T. (1997). A Survey of Augmented Reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 6(4), 355–385.
- Bacca, J., Baldiris, S., Fabregat, R. & Graf, S. (2014). Augmented reality trends in education: A systematic review of research and applications. *Journal of Educational Technology & Society*, 17(4), 133–149.
- Backhaus, K., Erichson, B., Gensler, S., Weiber, R. & Weiber, T. (2011). *Multivariate Analysemethoden: Eine anwendungsorientierte Einführung* (10. Aufl.). *Lehrbuch*. Springer Gabler.
- Backwinkel GmbH. (2023). *MERGE EDU Klassen-Set Klassen-Set mit 30 Cubes*.
<https://www.backwinkel.de/merge-edu-klassen-set-klassen-set-mit-30-cubes.html>

- Baddeley, A. (1992). Working memory. *Science*, 255(5044), 556–559.
- Baddeley, A. (2007). *Working memory, thought, and action*. Oxford University Press.
- Baddeley, A. D. (2002). Is working memory still working? *European Psychologist*, 7(2), 85–97.
- Bandura, A. (1997). *Self-efficacy: The exercise of control*. Freeman.
- Bandura, A. (2001). Social cognitive theory: an agentic perspective. *Annual review of psychology*, 52, 1–26.
- Bannert, M. (2009). Promoting Self-Regulated Learning Through Prompts. *Zeitschrift für Pädagogische Psychologie*, 23(2), 139–145. <https://doi.org/10.1024/1010-0652.23.2.139>
- Banse, G. (1973). Modell und Erkenntnis in der Schule. *Chemie in der Schule*, 5, 179–189.
- Barke, H. (2006). *Chemiedidaktik: Diagnose und Korrektur von Schülervorstellungen*. Springer-Lehrbuch. Springer.
- Baron, R. M. & Kenny, D. A. (1986). The moderator-mediator variable distinction in social psychological research: conceptual, strategic, and statistical considerations. *Journal of personality and social psychology*, 51(6), 1173–1182.
- Baumert, J. & Kunter, M. (2006). Stichwort: Professionelle Kompetenz von Lehrkräften. *Zeitschrift für Erziehungswissenschaft*, 9(4), 469–520.
- Beck, C. (2017). *Biologiespezifisches Bildverständnis beim Umgang mit multiplen externen Repräsentationen: Entwicklung und Validierung eines Kompetenzmodells zur Integration von Diagrammen und Schemata* [Dissertation]. Technische Universität München, München.
- Beck, C. & Nerdel, C. (2015). *Multiple externe Repräsentationen (MER) als schwierigkeitsgenerierende Merkmale in Biologieaufgaben*. Technische Universität München.
- Beck, C. & Nerdel, C. (2019). Biologiespezifisches Bildverständnis - Ein Kompetenzmodell zur Integration von Text-Bild-Kombinationen. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 25(1), 289–306.
- Beier, R. (1980). *Englische Fachsprache*. W.Kohlhammer GmbH.
- Benes, E. (1971). Fachtext, Fachstil und Fachsprache. In H. Moser (Hrsg.), *Sprache und Gesellschaft: Beiträge zur soziolinguistischen Beschreibung der deutschen Gegenwartssprache: Jahrbuch 1970*. Schwann Verlag.
- Berney, S. & Bétrancourt, M. (2016). Does animation enhance learning? A meta-analysis. *Computers & Education*, 101, 150–167.
- Bernholt, S., Fischer, I., Heuer, S., Taskin, V., Martens, J. & Parchmann, I. (2012). Die chemische Formelsprache - (un-) vermeidbare Hürden auf dem Weg zu einer Verständnisenwicklung? *CHEMKON*, 19(4), 171–178.

- Bernholt, S., Härtig, H., Precht, H. & Retelsdorf, J. (2015). Unterrichtssprache im Fachunterricht - Stand der Forschung und Forschungsperspektiven am Beispiel des Textverständnisses. In Fachsektion Didaktik der Biologie im VIBO (Hrsg.). Springer-Verlag.
- Bétrancourt, M. & Tversky, B. (2000). Effect of computer animation on users' performance: a review. *Le travail humain*, 63(4), 311–329.
- Bivall, P., Ainsworth, S. E. & Tibell, L. A. E. (2011). Do haptic representations help complex molecular learning? *Science education*, 95(4), 700–719.
<https://doi.org/10.1002/sce.20439>
- Bliefert, C., Ebel, H. F. & Greulich, W. (1990). *Schreiben und Publizieren in den Naturwissenschaften* (5. Aufl.). WILEY-VHC Verlag.
- Bodner, G. M. & Domin, D. S. (2000). Mental Models: The Role of Representations in Problem Solving in Chemistry. *University Chemistry Education*, 4(1), 24–30.
- Bonsen, M. & Rolff, H.-G. (2006). Professionelle Lerngemeinschaften von Lehrerinnen und Lehrern. *Zeitschrift für Pädagogik*, 52(2), 167–184. <https://doi.org/10.25656/01:4451>
- Borowski, A., Neuhaus, B. J., Tepner, O., Wirth, J., Fischer, H. E., Leutner, D., Sandmann, A. & Sumfleth, E. (2010). Professionswissen von Lehrkräften in den Naturwissenschaften (Pro-wiN) – Kurzdarstellung des BMMF-Projekts. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 16, 341–349.
- Bortz, J. & Schuster, C. (2010). *Statistik: für Human- und Sozialwissenschaftler* (7., vollst. überarb. und erw. Aufl.). Springer.
- Borukhovich-Weis, S., Grey, J., Łączkowska, E. & Gryl, I. (2021). Distanzlehre und die Einstellungen zukünftiger Lehrer*innen zu Digitalisierung. In A. Kienle, A. Harre, J. M. Haake & A. Lingnau (Hrsg.), *GI-Edition. Proceedings: Bd. 316. GI Edition Proceedings Band 316 DELFI 2021* (S. 307–318). Gesellschaft für Informatik e.V.
- Bosse, S., Jäntsch, C., Henke, T., Lambrecht, J., Koch, H. & Spörer, N. (2017). Das Zusammenspiel der Offenheit für Innovationen, der Einstellung zum inklusiven Lernen und der Selbstwirksamkeit von Lehrkräften. *Zeitschrift für Bildungsforschung*, 7, 131–146.
- Botella, F., Peñalver, A. & Borrás, F. (2018). Evaluating the usability and acceptance of an AR app in learning Chemistry for Secondary Education. In C. Manresa-Yee & R. M. Sansó (Hrsg.), *Proceedings of the XIX International Conference on Human Computer Interaction* (S. 1–8). ACM.
- Bruckermann, T., Mahler, D. & Meier, M. (2022). Erklärvideos im Biologieunterricht, vom informellen zum formalen Lernwerkzeug?! – Ein Diskussionsbeitrag der Tagung „Transfer in Forschung und Praxis“. *Zeitschrift für Didaktik der Biologie - Biologie Lehren und Lernen*, 26, 97–107. <https://doi.org/10.11576/zdb-5417>

- Buchner, J. (2023). Effekte eines Augmented Reality Escape Games auf das Lernen über Fake News. *MedienPädagogik: Zeitschrift für Theorie und Praxis der Medienbildung*, 51, 65–86.
- Buchner, J., Buntins, K. & Kerres, M. (2021). A systematic map of research characteristics in studies on augmented reality and cognitive load. *Computers and Education Open*, 2, 1–8.
- Buchner, J. & Freisleben-Teutscher, C. (2020). Die Erweiterung der Realität als Bildungschance: Fallbeispiele für immersives Lernen in Schule und Hochschule. In A. Beinsteiner, L. Blasch, T. Hug, P. Missomelius & M. Rizzoli (Hrsg.), *Medien - Wissen - Bildung. Augmentierte und virtuelle Wirklichkeiten* (1. Aufl., S. 175–188). Innsbruck university press.
- Buchner, J. & Zumbach, J. (2020). Augmented Reality in Teacher Education: A Framework to support Teachers' Technological Pedagogical Content Knowledge. *Italian Journal of Educational Technology*, 28(2), 106–120.
- Bühl, A. (2019). *SPSS: Einführung in die moderne Datenanalyse ab SPSS 25* (16., aktualisierte Auflage). Pearson.
- Bürg, O. (2005). *Akzeptanz von E-Learning in Unternehmen.: Die Bedeutung von institutionellen Rahmenbedingungen, Merkmalen des Individuums und Merkmalen der Lernumgebung für die Akzeptanz von E-Learning*. Logos.
- Bürg, O. & Mandl, H. (2005). Akzeptanz von E-Learning in Unternehmen. *Zeitschrift für Personalpsychologie*, 4(2), 75–85.
- Bürg, O., Rösch, S. & Mandl, H. (2005). *Die Bedeutung von Merkmalen des Individuums und Merkmalen der Lernumgebung für die Akzeptanz von E-Learning in Unternehmen*. Ludwig Maximilians Universität München, München.
- Burkhardt, M. E. & Brass, D. J. (1990). Changing Patterns or Patterns of Change: The Effect of a Change in Technology on Social Network Structure and Power. *Administrative Science Quarterly*, 1, 104–127.
- Cai, S., Chiang, F.-K., Sun, Y., Lin, C. & Lee, J. J. (2017). Applications of augmented reality-based natural interactive learning in magnetic field instruction. *Interactive Learning Environments*, 25(6), 778–791.
- Cai, S., Liu, E., Yang, Y. & Liang, J.-C. (2019). Tablet-based AR technology: Impacts on students' conceptions and approaches to learning mathematics according to their self-efficacy. *British Journal of Educational Technology*, 50(1), 248–263.
- Carrera, C. C., Perez, J. L. S. & La Cantero, J. d. T. (2018). Teaching with AR as a tool for relief visualization: usability and motivation study. *International Research in Geographical and Environmental Education*, 27(1), 69–84.

- Chandler, P. & Sweller, J. (1991). Cognitive Load Theory and the Format of Instruction. *Cognition and Instruction*, 8(4), 293–332.
- Chandrasegaran, A. L., Treagust, D. F. & Mocerino, M. (2007). The development of a two-tier multiple-choice diagnostic instrument for evaluating secondary school students' ability to describe and explain chemical reactions using multiple levels of representation. *Chemistry Education Research and Practice*, 8(3), 293–307.
- Chang, R.-C. & Yu, Z.-S. (2018). Using Augmented Reality Technologies to Enhance Students' Engagement and Achievement in Science Laboratories. *International Journal of Distance Education Technologies*. *International Journal of Distance Education Technologies*, 16(4), 54–72. <https://doi.org/10.4018/IJDET.2018>
- Chavan, S. R. (2016). Augmented Reality vs. Virtual Reality: Differences and Similarities. *International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology* 5, 1–6.
- chemie interaktiv (Hrsg.). (o.D.). *Chemie interaktiv - Die Synthese von Natriumchlorid aus den Elementen Natrium und Chlor*. https://www.chemie-interaktiv.net/html5_flash/nacl_synthese_5.html
- Cheng, K.-H. & Tsai, C.-C. (2013). Affordances of Augmented Reality in Science Learning: Suggestions for Future Research. *Journal of science education and technology*, 22(4), 449–462. <https://doi.org/10.1007/s10956-012-9405-9>
- Chi, M. T. H. (2006). Two Approaches to the Study of Experts' Characteristics. In K. A. Ericsson (Hrsg.), *The Cambridge handbook of expertise and expert performance*. Cambridge University Press.
- Chi, M. T. H. & Wylie, R. (2014). The ICAP Framework: Linking Cognitive Engagement to Active Learning Outcomes. *Educational Psychologist*, 49(4), 219–243.
- Chittleborough, G. (2014). Learning how to teach chemistry with technology: Pre-service teachers' experiences with integrating technology into their learning and teaching. *Journal of Science Teacher Education*, 25(4), 373–393.
- Chittleborough, G. & Treagust, D. F. (2007). The Modelling Ability of Non-Major Chemistry Students And Their Understanding Of The Sub-Microscopic Level. *Chemistry Education Research and Practice*, 8(3), 274–292.
- Cobb-Clark, D. A. & Schurer, S. (2012). The stability of big-five personality traits. *Economics Letters*, 115, 11–15.
- Cohen, J. (1988). *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*.
- Compeau, D. R. & Higgins, C. A. (1995). Computer Self-Efficacy: Development of a Measure and Initial Test. *MIS Quarterly*, 19(2), 189. <https://doi.org/10.2307/249688>

- Corradi, D. M. J., Elen, J., Schraepen, B. & Clarebout, G. (2014). Understanding Possibilities and Limitations of Abstract Chemical Representations for Achieving Conceptual Understanding. *International Journal of Science Education*, 36(5), 715–734.
- Crawford, B. A. . & Cullin, M. J. (2004). Supporting Prospective Teachers' Conceptions of Modelling in Science. *International Journal of Science Education*, 26(11), 1379–1401.
- Davidowitz, B. & Chittleborough, G. (2009). Linking the Macroscopic and Sub-microscopic Levels: Diagrams. In J. K. Gilbert & D. Treagust (Hrsg.), *Multiple Representations in Chemical Education, Models and Modelling in Science Education* (S. 169–191). Springer Netherlands.
- Davis, F. D. (1989). Perceived Usefulness, Perceived Ease of Use, and User Acceptance of Information Technology. *MIS Quarterly*, 13(3), 319–340.
<https://doi.org/10.2307/249008>
- Demarmels, S. (2012). Als ob die Sinne erweitert würden... Augmented Reality als Emotionalisierungsstrategie. *IMAGE. Zeitschrift für interdisziplinäre Bildwissenschaft. Themenheft zu Heft 16*, 8(2), 34–51. <https://doi.org/10.25969/mediarep/16554>
- Derman, A. & Ebenezer, J. (2020). The Effect of Multiple Representations of Physical and Chemical Changes on the Development of Primary Pre-service Teachers Cognitive Structures. *Research in Science Education*, 50(4), 1575–1601.
- Devetak, I., Urbančič, M., Wisiak Grm, K. S., Krnel, D. & Glažar, S. A. (2004). Submicroscopic Representations as a tool for evaluating students' conceptions. *Acta chimica Slovenica*, 51, 799–814.
- DigitUS-Digitalisierung von Unterricht in der Schule*. (2022). https://www.didaktik.bio.lmu.de/forschung/digitales_lehren_u_lernen/digitus-projekt/index.html
- DIN EN ISO 9241-110 (2020). Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 110: Interaktionsprinzipien (ISO_9241-110:2020); Deutsche Fassung EN_ISO_9241-110:2020*. Berlin. Beuth Verlag GmbH.
- Dinse de Salas, S. (2019). *Digitale Medien im Unterricht – Entwicklung professionellen Wissens und professionsbezogener Einstellungen durch Coaching* [Erlangung des Grades einer Doktorin der Philosophie (Dr. phil.)]. Pädagogischen Hochschule Heidelberg, Heidelberg.
- Domagk, S., Schwartz, R. N. & Plass, J. L. (2010). Interactivity in multimedia learning: An integrated model. *Computers in Human Behavior*, 26(5), 1024–1033.
- Dori, Y. J. & Kabermann, Z. (2012). Assessing high school chemistry students' modeling sub-skills in a computerized molecular modelling learning environment. *Instr Sci.*, 40, 69–91.
- Döring, N. (1997). Lernen und Lehren im Internet. In B. Batinic (Hrsg.), *Internet für Psychologen* (S. 359–393).

- Döring, N. & Bortz, J. (2002). *Forschungsmethoden und Evaluation für Sozialwissenschaftler* (2. Auflage). Springer Berlin Heidelberg.
- Döring, N. & Bortz, J. (2016). *Forschungsmethoden und Evaluation in den Sozial- und Humanwissenschaften*. (5. Auflage). Springer Berlin Heidelberg.
- Dorsch et al. (2013). Interferenz. In M. A. Wirtz (Hrsg.), *Dorsch - Lexikon der Psychologie* (16. Aufl.). Hans Huber.
- Drossel, K., Eickelmann, B., Schaumburg, H. & Labusch, A. (2019). Nutzung digitaler Medien und Prädiktoren aus der Perspektive der Lehrerinnen und Lehrer im internationalen Vergleich. In B. Eickelmann, W. Bos, J. Gerick, F. Goldhammer, H. Schaumburg, K. Schwippert, M. Senkbeil & J. Vahrenhold (Hrsg.), *ICILS 2018 #Deutschland. Computer- und informationsbezogene Kompetenzen von Schülerinnen und Schülern im zweiten internationalen Vergleich und Kompetenzen im Bereich Computational Thinking* (S. 205–240). Waxmann. <https://doi.org/10.25656/01:18325>
- Dunleavy, M. & Dede, C. (2014). Augmented Reality Teaching and Learning. In M. J. Spector, D. M. Merrill, J. Elen & M. J. Bishop (Hrsg.), *Handbook of Research on Educational Communications and Technology* (S. 735–745). Springer New York.
- Edelsbacher, P. (2022). *DAS SMARTPHONE ALS PHOTOMETER UND DESSEN EINSATZ IM CHEMIEUNTERRICHT: Umsetzungsmöglichkeiten und Experimente* [Masterarbeit]. Johannes Kepler Universität, Linz.
- Eickelmann, A., Andrés, E., Schnaubert, L., Narciss, S. & Sosnovsky, S. (2012). Interaktive Fehler-Finde- und Korrektur-Aufgaben. Eine Akzeptanz- und Usability-Studie bei Sechst- und Siebtklässlern. *Digitale Medien - Werkzeuge für exzellente Forschung und Lehre, Medien in der Wissenschaft*.
- Eickelmann, B. & Gerick, J. (2020). *Lernen mit digitalen Medien. Zielsetzungen in Zeiten von Corona und unter besonderer Berücksichtigung von sozialen Ungleichheiten*. Waxmann.
- Eilks, I. (2007). *Neue Wege zum Teilchenkonzept - Oder: Wie man Basiskonzepte forschungs-und praxisorientiert entwickeln kann*.
- Eilks, I. (2008). Modelle und Modelldenken im Chemieunterricht. In MNU-Dokumentation - 15. Fachleitertagung Chemie (Vorsitz).
- Eilks, I. (2012). The role and potential dangers of visualisation when learning about sub-microscopic explanations in chemistry education. *CEPS Journal*, 2 (CEPS Journal 2 (2012) 1, S. 125-145).
- Eisinga, R., Grotenhuis, M. & Pelzer, B. (2013). The reliability of a two-item scale: Pearson, Cronbach, or Spearman-Brown? *International journal of public health*, 58(4), 637–642.

- Eitel, A. & Scheiter, K. (2015). Picture or text first? Explaining sequence effects when learning with pictures and text. *Educational Psychology Review*, 27(1), 153–180.
- Eitel, A., Scheiter, K., Schüler, A., Nyström, M. & Holmqvist, K. (2013). How a picture facilitates the process of learning from text: Evidence for scaffolding. *Learning and Instruction*, 28, 48–63. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2013.05.002>
- Eppler, M. & Mickeler, F. (2003). The Evaluation of New Media in Education: Key Questions of an E-Learning Measurement Strategy. *Studies in Communication Sciences, Special Issue New Media in Education*, Lugano.
- Ericsson, K. A. & Simon, H. A. (1993). *Protocol analysis: Verbal reports as data (Rev. ed.)*. MA: Bradford Books/ MIT Press.
- Erlenbach, R. & Frank, C. (2022). Rolle des Vorwissens beim Lernen mit externalen Repräsentationen: Theoriegeleitete Ableitung und systematisches Literaturreview. *Unterrichtswissenschaft*, 50, 479–516.
- Ertmer, P. A., Ottenbreit-Leftwich, A. T. & Tondeur, J. (2015). Teachers' beliefs and uses of technology to support 21st-century teaching and learning. In H. Fives & M. Gregoire Gill (Hrsg.), *International Handbook of Research on Teachers' Beliefs* (S. 403–418). Routledge.
- Evans, J. & Stanovich, K. E. (2013). Dual-Process Theories of Higher Cognition: Advancing the Debate. *Perspectives on psychological science : a journal of the Association for Psychological Science*, 8(3), 223–241.
- Farida, I. (2009). The Importance of Development of Representational Competence in Chemical Problem Solving Using Interactive Multimedia. *International Seminar on Science Education*.
- Farida, I., Liliyasi, Widyantoro, D. H. & Sopandi, W. (2010). Representational Competence's Profile of Pre-Service Chemistry Teachers in Chemical Problem Solving. *International Seminar on Science Education*.
- Field, A. P. (2018). *Discovering statistics using IBM SPSS statistics (5. Aufl.)*. SAGE edge. SAGE Publications.
- Figl, K. (2010). Deutschsprachige Fragebögen zur Usability-Evaluation im Vergleich. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 4, 321–337.
- Fiorella, L. & Mayer, R. E. (2021). Principles for Reducing Extraneous Processing in Multimedia Learning. In R. E. Mayer & L. Fiorella (Hrsg.), *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning* (S. 185–198). Cambridge University Press.
- Fischer, F., Wecker, C. & Stegmann, K. (2015). *Auswirkungen digitaler Medien auf den Wissens- und Kompetenzerwerb in der Schule [Kurzbericht]*. Ludwig Maximilians Universität München, München.

- Fishbein, M. & Ajzen, I. (2010). *Predicting and Changing Behavior. The Reasoned Action Approach*. Psychology Press.
- Fitting, N., Ulber, R., Czubatinski, L. & Hornung, G. (2023). Evaluation digitaler Arbeitsblätter im Chemieunterricht in Hinblick auf Usability und Interesse. In J. Roth, M. Baum, K. Eilerts, G. Hornung & T. Trefzger (Hrsg.), *Die Zukunft des MINT-Lernens – Band 2: Digitale Tools und Methoden für das Lehren und Lernen* (1. Aufl., S. 93–108). Springer Berlin Heidelberg; Imprint: Springer Spektrum. https://doi.org/10.1007/978-3-662-66133-8_7
- Fladt, R. (1984). *Kurskorrektur im Chemieunterricht. Dargestellt an der Einführung und Anwendung des Teilchenmodells in der Sekundarstufe I*.
- Flaherty, E. G. (2014). The Thinking Aloud Technique and Problem Solving Ability. *The Journal of Educational Research*, 68(6), 223–225.
- Fleige, J., Seegers, A., Upmeyer zu Belzen, A. & Krüger, D. (2012). *Modellkompetenz im Biologieunterricht 7 -10* (2. Auflage). Auer.
- Fleischer, T. (2018). Untersuchung der chemischen Fachsprache unter besonderer Berücksichtigung chemischer Repräsentationen. In H. Niedderer, H. Fischler & E. Sumfleth (Hrsg.), *Studien zum Physik- und Chemielernen*. Logos Verlag.
- Fleischer, T., Deibl, I., Moser, S., Strahl, A., Maier, S. & Zumbach, J. (2023). Mobile Eye Tracking during Experimenting with Digital Scaffolding—Gaze Shifts between Augmented Reality and Experiment during Zinc Iodide Electrolysis Set-Up. *Education Sciences*, 13(2), 170.
- Fleischer, T., Deibl, I., Strahl, A., Moser, S., Maier, S. & Zumbach, J. (2020). EXBOX-Digital-Praxisorientiertes Unterrichtskonzept zum Einsatz digitaler Medien im Chemie- und Physikunterricht. In J. Zumbach, G. Maresch, T. Fleischer & A. Strahl (Hrsg.), *Salzburger Beiträge zur Lehrer/innen/bildung: Bd. 8. Neue Impulse in der Naturwissenschaftsdidaktik* (1. Aufl.). Waxmann.
- Fleischer, T., Maier, S. C., Deibl, I., Moser, S., Strahl, A. & Zumbach, J. (2020). Innovative Experimentierboxen für den Chemie- und Physikunterricht. In S. Habig (Hrsg.), *Naturwissenschaftliche Kompetenzen in der Gesellschaft von morgen* (S. 963–966). Universität Duisburg-Essen (Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik; 40). https://www.gdcp-ev.de/wp-content/tb2020/TB2020_963_Fleischer.pdf
- Fleischer, T., Tatzgern, M., Deibl, I. & Zumbach, J. (2022). Das Virtual Reality Chemielabor ChemGerLab – Experimentieren in der virtuellen Realität. In E. M. Watts & C. Hoffmann (Hrsg.), *Edition Fachdidaktiken. Digitale NAWI-gation von Inklusion: Digitale Werkzeuge für einen inklusiven Naturwissenschaftsunterricht* (S. 115–122). Springer Fachmedien Wiesbaden.

- Fleischer, T., Virtbauer, L. & Strahl, A. (2019). *Experimente im NAWI-Unterricht - Kompetenzen angehender Lehrkräfte. Naturwissenschaftliche Kompetenzen in der Gesellschaft von morgen. GDPC Jahrestagung in Wien.*
- Forschungsgruppe Lehrerbildung Digitaler Campus Bayern (2017). Kernkompetenzen von Lehrkräften für das Unterrichten in einer digitalisierten Welt. *merz spektrum*, 65–74.
- Frank, F., Kreikenbohm, A., Schwanke, H., Stolzenberger, C., Wolf, N. & Trefzger, T. (2021). Theorie begreifbar machen - Immersive Modellbildung im naturwissenschaftlichen Schulunterricht: Vorteile des Einsatzes von AR-Applikationen in der schulischen Elektrizitätslehre, 48–53.
- Freese, M., Winkelmann, J., Ullrich, M., Teichrew, A. & Erb, R. (2021). Einsatz von Augmented Reality: Phasenvernetzt und praxisorientiert vermittelt. In M. Kubsch, S. Sorge, J. Arnold & N. Graulich (Hrsg.), *Lehrkräftebildung neu gedacht. Ein Praxishandbuch für die Lehre in den Naturwissenschaften und deren Didaktiken* (S. 237–242). Waxmann Verlag GmbH.
- Frick, D. E. (2019). *Statische und dynamische Unterstützung bei mathematischen Modellierungsaufgaben in der Biologie* [Dissertation]. Technische Universität München, München.
- Gabel, D. (1998). The complexity of chemistry and implications for teaching. In B. J. Fraser & K. G. Tobin (Hrsg.), *International handbook of science education* (S. 233–248). Kluwer Academic Publishers.
- Garzón, J. & Acevedo, J. (2019). Meta-analysis of the impact of Augmented Reality on students' learning gains. *Educational Research Review*, 27, 244–260.
- Gee, J. P. (2004). Language in the science classroom: Academic social languages as the heart of school-based literacy. In R. K. Yerrick & W.-M. Roth (Hrsg.), *Establishing Scientific Classroom Discourse Communities: Multiple voices of teaching and learning research* (S. 19–37). Routledge.
- Genter, D. & Stevens, A. L. (1983). *Mental Models*. Taylor and Francis. Zugriff unter <http://gbv.ebib.com/patron/FullRecord.aspx?p=1596442>
- Genter, D. & Whitley, E. W. (1997). Mental models of population growth: A preliminary investigation. In M. H. Bazerman (Hrsg.), *Environment, ethics and behavior* (S. 209–233). New Lexington Press.
- Gilbert, J. K. (1999). On the Explanation of Change in Science and Cognition. *Science & Education*, 8(5), 543–557. <https://doi.org/10.1023/A:1008648425947>
- Gilbert, J. K. (2004). Models and Modelling: Routes to More Authentic Science Education. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 2(2), 115–130. <https://doi.org/10.1007/s10763-004-3186-4>

- Gilbert, J. K. & Treagust, D. (2009). Towards a Coherent Model for Macro, Submicro and Symbolic Representations in Chemical Education. In J. K. Gilbert & D. Treagust (Hrsg.), *Multiple Representations in Chemical Education, Models and Modelling in Science Education* (S. 333–350). Springer Netherlands.
- Girwidz, R. (2015). Neue Medien und Multimedia. In E. Kircher, R. Girwidz & P. Häußler (Hrsg.), *Springer-Lehrbuch. Physikdidaktik* (S. 401–427). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-41745-0_12
- Glowinski, I. (2007). *Schülerlabore im Themenbereich Molekularbiologie als Interesse fördernde Lernumgebungen* [Dissertation zur Erlangung eines Doktorgrades der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät]. Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Kiel.
- Goertz, L. & Baeßler, B. (2018). *Überblicksstudie zum Thema Digitalisierung in der Lehrerbildung. Arbeitspapier Nr. 36*. Hochschulforum Digitalisierung.
- Goldin, G. A. & Kaput, J. J. (1996). A joint perspective on the idea of representation in learning doing mathematics. In L. P. Steffe (Hrsg.), *Theories of mathematical learning* (S. 397–430). L. Erlbaum Associates.
- Goldkühle, P. (1993). *Modellbildung und Simulation im Physikunterricht*. Soest: Verlagskontor.
- Goodhue, D. L. (1995). Understanding User Evaluations of Information Systems. *INFORMS*, 41(12), 1827–1844.
- Gordon, C., Tindall-Ford, S., Agostinho, S. & Paas, F. (2016). Learning from Instructor-managed and Self-managed Split-attention Materials. *Applied Cognitive Psychology*, 30(1), 1–9. <https://doi.org/10.1002/acp.3159>
- Gouvea, J. & Passmore, C. (2017). 'Models of' versus 'Models for'. *Science & Education*, 26(1-2), 49–63.
- Gräber, W. (2002). „Scientific Literacy“ - Naturwissenschaftliche Bildung in der Diskussion. In P. Döbrich (Hrsg.), *Qualitätsentwicklung im naturwissenschaftlichen Unterricht. Fachtagung am 15. Dezember 1999. Frankfurt am Main : GFPP ; DIPF 2002* (Materialien zur Bildungsforschung, S. 1–28). <https://doi.org/10.25656/01:3443>
- Graf, D. (1989). *Begriffslernen im Biologieunterricht der Sekundarstufe I* [Dissertation], Gießen.
- Graham, C. R., Burgoyne, N., Cantrell, P., Smith, L., St. Clair, L. & Harris, R. (2009). TPACK Development in Science Teaching: Measuring the TPACK confidence of inservice science teachers. *TechTrends*, 53(5), 70–79.
- Gräsel, C. (1997). *Problemorientiertes Lernen*. Hogrefe.
- Gräsel, C. (2000). Neue Medien neues Lernen? Versprechungen und Forschungsergebnisse. *DGU Nachrichten*, 21, 8-15.

- Gräsel, C., Mandl, H., Manhart, P. & Kruppa, K. (2000). Das BLK-Programm "Systematische Einbeziehung von Medien, Informations und Kommunikationstechnologien in Lehr- und Lernprozesse". *Unterrichtswissenschaft*, 28(2), 127–143.
- Grossman, P. L. (1990). *The making of a teacher: teacher knowledge and teacher education*. Teachers College Press.
- Grüner, G. (1967). Die didaktische Reduktion als Kernstück der Didaktik. In *Die Deutsche Schule. DDS*. Waxmann Verlag.
- Guthke, T. & Beyer, R. (1992). Inferenzen beim Satz- und Textverstehen. *Zeitschrift für Psychologie*, 200, 321–344.
- Haas, J.-B. & Marohn, A. (2022). The teaching concept chem:LEVEL – promoting technical language on the basis of the Johnstone triangle. *CHEMKON*, 29(S1), 213–217.
- Habig, S. (2019). *Augmented Reality Chemistry – Förderung internaler Modellrepräsentation in Organischer Chemie durch AR*.
- Halloun, I. A. (2007). Mediated Modeling in Science Education. *Science & Education*, 16(7-8), 653–697.
- Hammer, S. P. & Groß, K. (2020). CHEMideos–Fachdidaktische Analyse chemischer Erklärvideos. In S. Habich (Vorsitz), *Naturwissenschaftlicher Unterricht und Lehrerbildung im Umbruch*.
- Hammond, G. S., Osteryoung, J., Crawford, T. H. & Gray, H. B. (1976). *Modellvorstellungen in der Chemie* (1. Aufl.). de Gryter.
- Harris, J. B. & Hofer, M. J. (2011). Technological Pedagogical Content Knowledge (TPACK) in Action. *Journal of Research on Technology in Education*, 43(3), 211–229.
<https://doi.org/10.1080/15391523.2011.10782570>
- Harrison, A. G. (1996). *Conceptual change in secondary chemistry: the role of multiple analogical models of atoms and molecules* [Unpublished Ph.D thesis]. Curtin University of Technology, Perth, Western Australia.
- Harrison, A. G. & Treagust, D. (1996). Secondary students' mental models of atoms and molecules: Implications for teaching chemistry. *Science education*, 80(5), 509–534.
- Harrison, A. G. & Treagust, D. (2000). A typology of school science models. *International Journal of Science Education*, 22(9), 1011–1026.
- Härtig, H., Ostermann, A., Ropohl, M., Schwanewedel, J., Kampschulte, L. & Lindmeier, A. (2021). Gibt es einen fachspezifischen Medieneinsatz im naturwissenschaftlichen Fachunterricht? Ergebnisse einer Fragebogenerhebung. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 27(1), 139–154.
- Hartmut, J. (2004). Aspekte einer neuen Lehrkultur. In F. Schumacher (Hrsg.), *Innovativer Unterricht mit neuen Medien Ergebnisse wissenschaftlicher Begleitung von SEMIK-Einzelprojekten - SEMIK Systematische Einbeziehung von Medien, Informations- und*

- Kommunikationstechnologien in Ler- und Lernprozesse* (S. 9–33). FWU Institut für Film und Bild in Wissenschaft und Unterricht.
- Hartong, S., Breiter, A., Jarke, J. & Förchler, A. (2019). Digitalisierung von Schule, Schulverwaltung und Schulaufsicht. In T. Klenk, F. Nullmeier & G. Wewer (Hrsg.), *Handbuch Digitalisierung in Staat und Verwaltung* (S. 1–10). Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-23669-4_43-1
- Hausmann, R. & Vuong, A. (2012). Testing the Split Attention Effect on Learning in a Natural Educational Setting Using an Intelligent Tutoring System for Geometry. *Proceedings of the Annual Meeting of the Cognitive Science Society*, 34(34), 438–443.
- Häußler, P., Girwidz, R. & Kirchner, E. (2015). *Physikdidakik - Theorie und Praxis* (2. Aufl.). Springer-Verlag.
- Heinen, R. & Kerres, M. (2017). „Bildung in der digitalen Welt“ als Herausforderung für Schule. *DDS - Die Deutsche Schule*, 109(2), 128–145.
- Hellriegel, J. & Čubela, D. (2018). Das Potenzial von Virtual Reality für den schulischen Unterricht - Eine konstruktivistische Sicht. *MedienPädagogik: Zeitschrift für Theorie und Praxis der Medienbildung*, 58–80.
- Helmke, A. (2002). Kommentar: Unterrichtsqualität und Unterrichtsklima: Perspektiven und Sackgassen. *Unterrichtswissenschaft*, 30(3), 261–277.
- Henne, A., Beuter, A., Hachfeld, A., Schumann, S. & Möhrke, P. (2021). Naturwissenschaftlicher Unterricht während der Corona-Pandemie. In S. Habig (Vorsitz), *Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, 47. Jahrestagung (virtuell) 2020*. Symposium im Rahmen der Tagung von Universität Duisburg-Essen, Duisburg.
- Hense, J., Mandl, H. & Gräsel, C. (2001). Problemorientiertes Lernen - Warum Unterricht mehr sein muss als Unterricht mit neuen Medien. *Computer und Unterricht*, 44, 6–11.
- Herga, N. R., Čagan, B. & Dinevski, D. (2016). Virtual Laboratory in the Role of Dynamic Visualisation for Better Understanding of Chemistry in Primary School. *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 12(3), 593–608.
- Hettmannsperger, R. (2015). *Lernen mit multiplen Repräsentationen aus Experimenten: Ein Beitrag zum Verstehen physikalischer Konzepte*. Springer VS.
- Hill, T., Smith, N. D. & Mann, M. F. (1987). Role of Efficacy Expectations in Predicting the Decision to Use Advanced Technologies: The Case Of Computers. *Journal of Applied Psychology*, 3, 307–313.
- Hillmayr, D., Reinhold, F., Ziernwald, L. & Reiss, K. (2017). *Digitale Medien im mathematisch-naturwissenschaftlichen Unterricht der Sekundarstufe. Einsatzmöglichkeiten, Umsetzung und Wirksamkeit*. Waxmann.

- Höffler, T. N. & Leutner, D. (2007). Instructional animation versus static pictures: A meta-analysis. *Learning and Instruction*, 17(6), 722–738. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2007.09.013>
- Hoffmann, J. (1986). *Die Welt der Begriffe*. VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften.
- Hoffmann, R. & Laszlo, P. (1991). Darstellungen in der Chemie — die Sprache der Chemiker. *Angewandte Chemie*, 103(1), 1–16.
- Holland, P. W. (1986). Statistics and causal inference. *Journal of the American statistical Association*, 81(396), 945–960.
- Holleman, A. F. & Wiberg, E. (1995). *Lehrbuch der Anorganischen Chemie* (101. Aufl.). Walter De Gruyter.
- Hubermann, M. Der berufliche Lebenszyklus von Lehrern: Ergebnisse einer empirischen Untersuchung. In (S. 249–267).
- Huk, T. (2006). Who benefits from learning with 3D models? the case of spatial ability. *Journal of Computer Assisted Learning*, 22(6), 392–404. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2729.2006.00180.x>
- Hüther, J. (2005). Neue Medien. In J. Hüther & B. Schorb (Hrsg.), *Grundberiffe Medienpädagogik* (S. 345–351).
- Huwer, J. & Banerji, A. (2020). Corona sei Dank?! – Digitalisierung im Chemieunterricht. *CHEMKON*, 27(3), 105–106.
- Huwer, J. & Brünken, R. (2018). Naturwissenschaften auf neuen Wegen : Individualisierung mit Tablets im Chemie-Unterricht. *Computer + Unterricht : Lernen und Lehren mit digitalen Medien*, 110, 7–10.
- Huwer, J., Irion, T., Kuntze, S., Schaal, S. & Thyssen, C. (2019). Von TPaCK zu DPaCK – Digitalisierung im Unterricht erfordert mehr als technisches Wissen. *MNU Journal*.
- Huwer, J., Lauer, L., Dörrenbächer-Ulrich, L., Perels, F. & Thyssen, C. (2019). Chemie neu erleben mit Augmented Reality: Neue Möglichkeiten der individuellen Förderung. *MNU Journal*, 420–427.
- Huwer, J., Thyssen, C. & Vogelsang, C. (2021). Lehre:digital – Erwerb digitaler Lehrkompetenz im fächerübergreifenden Kontext Chemie, Biologie und Physik. In M. Beißwenger, B. Bulizek, I. Gryl & F. Schacht (Hrsg.), *Digitale Innovationen und Kompetenzen in der Lehramtsausbildung* (1. Aufl., S. 353–367). Universitätsverlag Rhein-Ruhr.
- Ibáñez, M. B. & Delgado-Kloos, C. (2018). Augmented reality for STEM learning: A systematic review. *Computers & Education*, 123, 109–123.
- Ibáñez, M. B., Di Serio, Á., Villarán, D. & Delgado Kloos, C. (2014). Experimenting with electromagnetism using augmented reality: Impact on flow student experience and educational effectiveness. *Computers & Education*, 71, 1–13.

- Irion, T. & Knoblauch, V. (2021). Lernkulturen in der Digitalität. Von der Buchschule zum zeitgemäßen Lebens- und Lernraum im 21. Jahrhundert. In M. Peschel (Hrsg.), *Kinder lernen Zukunft. Didaktik der Lernkulturen*. (S. 122–145). Grundschulverband. <https://doi.org/10.25656/01:24387>
- Jaber, L. Z. & BouJaoude, S. (2012). A Macro-Micro-Symbolic Teaching to Promote Relational Understanding of Chemical Reactions. *International Journal of Science Education*, 34(7), 973–998.
- Jacob, T. & Centofanti, S. (2023). Effectiveness of H5P in improving student learning outcomes in an online tertiary education setting. *Journal of Computing in Higher Education*, 1–17.
- Jäger, P., Kieffer, A., Lorenz, A. & Nistor, N. (2014). Der Einfluss der didaktischen Gestaltung auf die Akzeptanz und Nutzung von moodle in der Hochschullehre. *Lernräume gestalten - Bildungskontexte vielfältig denken, Medien in der Wissenschaft*.
- Jeffels, P. (2011). *Usability in relation to e-learning projects*.
- Jimoyiannis, A. & Komis, V. (2007). Examining teachers' beliefs about ICT in education: implications of a teacher preparation programme. *Teach. Dev.*, 11, 149–173.
- Johannesmeyer, F. (2004). *Stationen auf dem Weg ins Diskontinuum im Chemieunterricht der Sekundarstufe I* [Dissertation]. Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Oldenburg.
- Johnson, C. I. & Mayer, R. E. (2012). An eye movement analysis of the spatial contiguity effect in multimedia learning. *Journal of experimental psychology: Applied*, 18(2), 178–191. <https://doi.org/10.1037/a0026923>
- Johnson-Laird, P. N., Goodwin, G. P. & Khemlani, S. S. (2018). Mental models and reasoning. In L. J. Ball & V. A. Thompson (Hrsg.), *The Routledge international handbook of thinking and reasoning* (S. 346–365).
- Johnstone, A. H. (1993). The development of chemistry teaching: A changing response to changing demand. *Journal of Chemical Education*, 70(9), 701–705.
- Johnstone, A. H. (2000). Teaching of Chemistry – logical or psychological? *Chemistry Education Research and Practice in Europe*, 1(1), 9–15.
- Johnstone, A. H. (2009). Multiple Representations in Chemical Education. *International Journal of Science Education*, 31(16), 2271–2273.
- Johnstone, R. S. (1982). Phonological coding in dyslexic readers. *British Journal of Psychology*, 73(4), 455–460.
- Jong, T. e. a. (2021). Understanding teacher design practices for digital inquiry-based science learning: the case of Go-Lab. *Educational Technology Research & Development*, 69, 417–444.

- Jonkisz, E., Moosbrugger, H. & Brandt, H. (2012). Planung und Entwicklung von Tests und Fragebogen. In H. Moosbrugger & A. Kelava (Hrsg.), *Springer-Lehrbuch. Testtheorie und Fragebogenkonstruktion* (2. Aufl., S. 27–74). Springer Berlin Heidelberg.
- Justi, R. & Gilbert, J. (2002a). Science teachers' knowledge about and attitudes towards the use of models and modelling in learning science. *International Journal of Science Education*, 24(12), 1273–1292.
- Justi, R. & Gilbert, J. (2002). Models and Modelling in Chemical Education. In J. K. Gilbert, O. Jong, R. Justi, D. F. Treagust & J. H. Driel (Hrsg.), *Science & Technology Education Library. Chemical Education: Towards Research-based Practice* (Bd. 17, S. 47–68). Kluwer Academic Publishers.
- K19+ - Rahmenmodell der Kernkompetenzen. (2023). https://www.digillab.mcls.uni-muenchen.de/forschung/digitale-kernkompetenzen/k19_rahmenmodell_kk/index.html
- Kabaum, M. & Anders, P. (2020). Warum die Digitalisierung an der Schule vorbeigeht. Begründungen für den Einsatz von Technik im Unterricht in historischer Perspektive. *Zeitschrift für Pädagogik*, 66(3), 309–323. <https://doi.org/10.25656/01:25796>
- Kahneman, D. (2011). *Fast and slow thinking*. Allen Lane and Penguin Books.
- Kalyuga, S. (2011). Cognitive Load Theory: How Many Types of Load Does It Really Need? *Educational Psychology Review*, 23(1), 1–19. <https://doi.org/10.1007/s10648-010-9150-7>
- Kalyuga, S., Ayres, P., Chandler, P. & Sweller, J. (2003). The expertise reversal effect. *Educational Psychologist*, 38(1).
- Kalyuga, S. & Sweller, J. (2014). The Redundancy Principle in Multimedia Learning. In R. E. Mayer (Hrsg.), *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning* (2. Aufl., S. 247–262). Cambridge University Press.
- Kammerl, R. (2018). Bildung und Lehrerbildung im digitalen Wandel. Zur Forderung nach einem „Primat des Pädagogischen“. In T. Hug (Hrsg.), *Medienpädagogik - Herausforderungen für Lernen und Bildung im Medienzeitalter* (S. 19–32). Innsbruck university press.
- Kapici, H. O. (2023). From Symbolic Representation to Submicroscopic One: Preservice Science Teachers' Struggle with Chemical Representation Levels in Chemistry. *International Journal of Research in Education and Science*, 9(1), 134–147.
- Karapanos, M., Becker, C. & Christophel, E. (2018). Die Bedeutung der Usability für das Lernen mit digitalen Medien. *MedienPädagogik: Zeitschrift für Theorie und Praxis der Medienbildung*, 36–57.
- Kauertz, A. (2014). Entwicklung eines Rasch-skalierten Leistungstests. In D. Krüger, I. Parchmann & H. Schecker (Hrsg.), *Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung* (S. 341–353). Springer Berlin Heidelberg.

- Kaufeld, M., Mundt, M., Forst, S. & Hecht, H. (2022). Optical see-through augmented reality can induce severe motion sickness. *Displays*, 74, 102283.
<https://doi.org/10.1016/j.displa.2022.102283>
- Keiner, L. & Graulich, N. (2020). Transitions between representational levels: characterization of organic chemistry students' mechanistic features when reasoning about laboratory work-up procedures. *Chemistry Education Research and Practice*, 21(1), 469–482.
- Kekulé, A. (1861). *Lerhbuch der organischen Chemie oder der Chemie der Kohlenstoffverbindungen*.
- Keller, S. & Habig, S. (2022). Supporting Spatial Thinking in Organic Chemistry Through Augmented Reality—An Explorative Interview Study. In N. Graulich & G. Shultz (Hrsg.), *Student Reasoning in Organic Chemistry* (S. 19–35). The Royal Society of Chemistry.
- Keller, S., Rumann, S. & Habig, S. (2021). Cognitive Load Implications for Augmented Reality Supported Chemistry Learning. *Information*, 12(96), 1–20.
- Kelly, R. M., Barrera, J. H. & Mohamed, S. C. (2010). An Analysis of Undergraduate General Chemistry Students' Misconceptions of the Submicroscopic Level of Precipitation Reactions. *Journal of Chemical Education*, 87(1), 113–118.
- Kerres, M. (2012). *Mediendidaktik: Konzeption und Entwicklung mediengestützter Lernangebote*. OLDENBOURG WISSENSCHAFTSVERLAG.
<https://doi.org/10.1524/9783486716924>
- Kerres, M. (2018). *Mediendidaktik*. De Gruyter. <https://doi.org/10.1515/9783110456837>
- Kintsch, W. (1993). Information accretion and reduction in text processing: Inferences. *Discourse Processes*, 16(1-2), 193–202.
- Klafki, W. (1998). Zur Diskussion um eine „neue Allgemeinbildungskonzeption“ und um „epochaltypische Schlüsselprobleme“ als didaktisches Themenfeld. *Humane Schule in Theorie und Praxis*. Frankfurt aMua.
- Klos, S., Henke, C., Kieren, C., Walpuski, M & Sumfleth, E. (2008). Naturwissenschaftliches Experimentieren und chemisches Fachwissen - zwei verschiedene Kompetenzen. *Zeitschrift für Pädagogik*, 54(3), 304–321.
- Knüsel Schäfer, D. (2020). *Überzeugungen von Lehrpersonen zu digitalen Medien. Eine qualitative Untersuchung zu Entstehung, Bedingungsfaktoren und typenspezifischen Entwicklungsverläufen: Eine qualitative Untersuchung zu Entstehung, Bedingungsfaktoren und typenspezifischen Entwicklungsverläufen*. Verlag Julius Klinkhardt.
- Koehler, M. J., Mishra, P., Kereluik, K., Shin, T. S. & Graham, C. R. (2014). The Technological Pedagogical Content Knowledge Framework. In M. J. Spector, D. M. Merrill, J. E. Elen & M. J. Bishop (Hrsg.), *Handbook of Research on Educational Communications*

- and Technology* (S. 101–111). Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-3185-5_9
- Koerber, S. (2000). *Der Einfluss externer Repräsentationsformen auf proportionales Denken im Grundschulalter* [Genehmigte Dissertation], Berlin.
- Köhler, M. J. & Mishra, P. (2009). What Is Technological Pedagogical Content Knowledge? *Contemporary Issues in Technology and Teacher Education*, 9(1), 60–70.
- Kollmann, T. (1998). *Akzeptanz innovativer nutzungsger und -systeme: Konsequenzen fr die einföhrung von*. Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Konrad, K. (2010). Lautes Denken. In G. Mey & K. Mruck (Hrsg.), *Handbuch qualitative Forschung in der Psychologie* (1. Aufl., S. 476–490). VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- Kopp, B., Dvorak, S. & Mandl, H. (2003). *Evaluation des Einsatzes von Neuen Medien im Projekt "Geoinformation – Neue Medien für die Einführung eines neuen Querschnittsfachs"* (Forschungsbericht Nr. 161). Ludwig Maximilians Universität München, München.
- Kosslyn, S. M. (1994). *Image and brain: The resolution of the imagery debate*. The MIT Press.
- Kotzebue, L. von (2022). Beliefs, Self-reported or Performance-Assessed TPACK: What Can Predict the Quality of Technology-Enhanced Biology Lesson Plans? *Journal of science education and technology*, 31(5), 570–582.
- Kotzebue, L. von, Meier, M., Finger, A., Kremser, E., Huwer, J., Thoms, L.-J., Becker, S., Bruckermann, T. & Thyssen, C. (2021). The Framework DiKoLAN (Digital Competencies for Teaching in Science Education) as Basis for the Self-Assessment Tool DiKoLAN-Grid. *Education Sciences*, 11(12), 775.
- Kotzebue, L. von & Nerdel, C. (2012). Professionswissen von Biologielehrkräften zum Umgang mit Diagrammen: Biology teachers' professional knowledge on handling with diagrams. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 18, 181–200.
- Kozma, R. B. & Russell, J. (1997). Multimedia and Understanding: Expert and Novice Responses to Different Representations of Chemical Phenomena. *JOURNAL OF RESEARCH IN SCIENCE TEACHING*, 34(9), 949–968.
- Kozma, R. B. & Russell, J. (2005). Students Becoming Chemists: Developing Representational Competence. In J. K. Gilbert (Hrsg.), *Visualization in Science Education* (S. 121–146). Springer-Verlag.
- Krause, M. & Eilks, I. (2014). Tablet-Computer im Chemieunterricht: Apps und Anwendungen. *PdN CHEMIE in der Schule*, 63(4), 17–21.
- Krause, M. & Eilks, I. (2015). Lernen über digitale Medien in der Chemielehrerbildung. *CHEMKON*, 22(4), 173–178.

- Krnel, D., Watson, R. & Glažar, S. A. (1998). Survey of Research Related To the Development of the Concept of "Matter". *International Journal of Science Education*, 20(3), 257–289.
- Kroß, A. & Lind, G. (2001). The Impact of Prior Knowledge on the Intensity and Quality of Self-Explanations during Studying Worked-Out Examples from the Domain of Biology. *Unterrichtswissenschaft*, 29(1), 5–25.
- Krug, M., Czok, V., Müller, S., Weitzel, H., Huwer, J., Kruse, S. & Müller, W. (2022). AR in science education – an AR based teaching-learning scenario in the field of teacher education. *CHEMKON*, 29(S1), 312–318.
- Krug, M., Czok, V., Weitzel, H., Müller, W. & Huwer, J. (2021). Gestaltungsparameter für Lehr-Lernszenarien mit Augmented-Reality-Anwendungen im naturwissenschaftlichen Unterricht – ein Review. In N. Graulich, J. Huwer & A. Banerji (Hrsg.), *Digitalisation in Chemistry Education: Digitales Lehren und Lernen an Hochschule und Schule im Fach Chemie* (1. Aufl., S. 51–58).
- Krüger, D. (2007). Die Conceptual Change-Theorie. In D. Krüger & H. Vogt (Hrsg.), *Theorien in der biologiedidaktischen Forschung* (S. 81–92). Springer.
- Kuckartz, U., Rädiker, S., Ebert, T. & Schehl, J. (2013). *Statistik: Eine verständliche Einführung*. Springer VS.
- Kuhn, J. (2017). Physik Lehren und Lernen mit mobilen Kommunikationsmedien von heute und morgen. In J. Meßinger-Koppelt, S. Schanze & J. Groß (Hrsg.), *Lernprozesse mit digitalen Werkzeugen unterstützen: Perspektiven aus der Didaktik naturwissenschaftlicher Fächer* (S. 107–118). Joachim Herz Stiftung.
- Kuhn, J., Rophol, M. & Groß, J. (2017). Fachdidaktischer Mehrwert durch Einführung digitaler Werkzeuge. In J. Meßinger-Koppelt, S. Schanze & J. Groß (Hrsg.), *Lernprozesse mit digitalen Werkzeugen unterstützen: Perspektiven aus der Didaktik naturwissenschaftlicher Fächer* (S. 11–12). Joachim Herz Stiftung.
- Kuhn, J. & Vogt, P. (2015). Smartphones & Co. in Physics Education: Effects of Learning with New Media Experimental Tools in Acoustics. In W. Schnotz, A. Kauertz, H. Ludwig, A. Müller & J. Pretsch (Hrsg.), *Multidisciplinary Research on Teaching and Learning* (S. 253–269). Palgrave Macmillan UK.
https://doi.org/10.1057/9781137467744_14
- Kultusministerkonferenz. (2005). *Bildungsstandards im Fach Chemie für den Mittleren Schulabschluss*. http://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen_beschluesse/2004/2004_12_16-Bildungsstandards-Chemie.pdf
- Kultusministerkonferenz. (2017). *Strategie der Kultusministerkonferenz „Bildung in der digitalen Welt“*.

- Lachmann, C., Ghomi, M. & Pinkwart, N. (2022). Ein Beispielansatz zur Vermittlung von digitaler Kompetenz im MINT-Lehramtsstudium. In J. Roth, M. Baum, K. Eilerts, G. Hornung & T. Trefzger (Hrsg.), *Die Zukunft des MINT-Lernens – Band 1: Perspektiven auf (digitalen) MINT-Unterricht und Lehrkräftebildung* (S. 123–138). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-66131-4_7
- Lachmayer, S., Nerdel, C. & Prechtel, H. (2007). Modellierung kognitiver Fähigkeiten beim Umgang mit Diagrammen im naturwissenschaftlichen Unterricht. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 13, 145–160.
- Lachner, A., Scheiter, K. & Stürmer, K. (2020). Digitalisierung und Lernen mit digitalen Medien als Gegenstand der Lehrerinnen- und Lehrerbildung. In C. Cramer, J. König, M. Rothland & S. Blömeke (Hrsg.), *Handbuch Lehrerinnen- und Lehrerbildung* (S. 67–75). Klinkhardt.
- Landriscina, F. (2009). Simulation and learning: the role of mental models. *Journal of e-Learning and Knowledge Society*, 5(2), 23–32.
- Lauer, L. & Peschel, M. (2021, 4. März). *Augmented Reality (AR) im Sachunterricht – Studie zur Evaluation von AR-Visualisierungstechnologien*. GDSU-Vorkonferenz 2021,
- Lauer, L. & Peschel, M. (2023). «Pedagogical Usability» von Augmented Reality zum Thema Elektrik. *MedienPädagogik: Zeitschrift für Theorie und Praxis der Medienbildung*, 51, 25–64.
- Lee, M., Billinghurst, M., Baek, W., Green, R. & Woo, W. (2013). A usability study of multimodal input in an augmented reality environment. *Virtual Reality*, 17(4), 293–305.
- Leerhoff, G. e. a. (2003). *Der Stoffbegriff und die Stoffeigenschaften - zentrale Problemfelder bei der Vermittlung der chem. Reaktion im frühen Chemieunterricht*. Teil 1 MNU 56(5/6): S. 301-303; und Teil 2 MNU 56 (7): S.364-367.
- Lehtinen, E. (1992). Lern- und Bewältigungsstrategien im Unterricht. In H. Mandl & H. F. Friedrich (Hrsg.), *Lern- und Denkstrategien* (S. 125–151). Hogrefe.
- Leisen, J. (2004). Der Wechsel der Darstellungsformen als wichtige Strategie beim Lehren und Lernen im DFU. *Fremdsprache Deutsch*, 30, 15–21.
- Leisen, J. (2005). Muss ich jetzt auch noch Sprache unterrichten? - Sprache und Physikunterricht. *Unterricht Physik*, 3, 4–9.
- Leisen, J. & Mentges, H. (2009). *Sachtexte lesen im Fachunterricht der Sekundarstufe*. Seelze-Velber: Klett Kallmeyer.
- Leisner-Bodenthin, A. (2006). Zur Entwicklung von Modellkompetenz im Physikunterricht. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 12, 91–109.
- Lemke, J. L. (1998). Teaching All the Languages of Science: Words, Symbols, Images, and Actions. *Conference on science education in Barcelona*, 483–492.

- Levin, B. B., He, Y. & Allen, M. H. (2013). Teacher Beliefs in Action. A Cross-Sectional, Longitudinal Follow-Up Study of Teachers' Personal Practical Theories. *The Teacher Educator*, 48, 201–217.
- Lewalter, D. (1997). *Lernen mit Bildern und Animationen*. Waxmann.
- Lewalter, D. & Walper, S. (2020). Editorial: Kompetenzen und Materialien für digitales Lernen und online-Kommunikation. Kompetenzen und Materialien für digitales Lernen und online-Kommunikation. *Psychologie in Erziehung und Unterricht*, 68(1), 2–3.
- Lienert, G. A. & Raatz, U. (1998). *Testaufbau und Testanalyse* (6. Auflage). Beltz Psychologie Verlags Union.
- Lim, K. Y. T. & Habig, S. (2020). Beyond observation and interaction: Augmented Reality through the lens of constructivism and constructionism. *British Journal of Educational Technology*, 51(3), 609–610.
- Lind, G., Friege, G., Kleinschmidt, L. & Sandmann, A. (2004). Beispiellernen und Problemlösen. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 10, 29–49.
- Lind, G., Friege, G. & Sandmann, A. (2005). Selbsterklären und Vorwissen. *Zeitschrift zur Theorie und Praxis erziehungswissenschaftlicher Forschung*, 19(1), 1–29.
- Lorenz, R., Bos, W., Endberg, M., Eickelmann, B., Grafe, S. & Vahrenhold, J. (Hrsg.). (2017). *Schule digital - der Länderindikator 2017. Schulische Medienbildung in der Sekundarstufe I mit besonderem Fokus auf MINT-Fächer im Bundesländervergleich und Trends von 2015 bis 2017*. Waxmann. <https://doi.org/10.25656/01:15656>
- Lorenz, R. & Endberg, M. (2019). Welche professionellen Handlungskompetenzen benötigen Lehrpersonen im Kontext der Digitalisierung in der Schule? *MedienPädagogik*, 61–81. <https://doi.org/10.21240/mpaed/00/2019.10.16.X>
- Lotz, M., Gabriel, K. & Lipowsky, F. (2013). Niedrig und hoch inferente Verfahren der Unterrichtsbeobachtung: Analysen zu deren gegenseitiger Validierung. *Z.f.Päd*, 59(3).
- Lund, A., Furberg, A., Bakken, J. & Engelién, K. L. (2014). What Does Professional Digital Competence Mean in Teacher Education? *Nordic Journal of Digital Literacy*, 9(4), 280–298. <https://doi.org/10.18261/ISSN1891-943X-2014-04-04>
- M. Al-Balushi, S. (2012). The effect of macroscopic and submicroscopic pictorial representations on pre-service science teachers' explanations. *International Journal of Academic Research*, 4(6), 10–14.
- Mahaffy, P. (2006). Moving Chemistry Education into 3D: A Tetrahedral Metaphor for Understanding Chemistry. *Journal of Chemical Education*, 82(1), 49–55.
- Mahr, B. (2008). Ein Modell des Modellseins: Ein Beitrag zur Aufklärung des Modellbegriffs. In U. Dirks & E. Knobloch (Hrsg.), *Modelle* (S. 187–218). P. Lang.

- Maier, P. (2014). *Augmented Chemical Reactions - Research on 3D Selection and Confirmation Methods* [Veröffentlichte Dissertation zum Erwerb des akademischen Grades eines Doktors der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.)]. <https://mediatum.ub.tum.de/1210447>
- Maresch, G. (2006). Die Cognitive Load Theory - Kriterien für multimediale Lernmaterialien. *eLearning-Didaktik an Österreichs Schulen*, 78–85.
- Martin, A., Wedding, S. & Schützenmeister, J. (2022). *Digitale Medienwelt und Pädagogikunterricht* (1. Aufl.). *Didaktik der Pädagogik: Bd. 6*. Waxmann.
- Mayer, R. E. (2002). Multimedia Learning. *The Annual Report of Educational Psychology in Japan*, 41, 27–29.
- Mayer, R. E. (Hrsg.). (2005). *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning* (2. Aufl.). Cambridge University Press.
- Mayer, R. E. (Hrsg.). (2014a). *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning* (2. Aufl.). Cambridge University Press.
- Mayer, R. E. (2014b). Cognitive Theory of Multimedia Learning. In R. E. Mayer (Hrsg.), *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning* (2. Aufl., S. 43–71). Cambridge University Press.
- Mayer, R. E. (2021a). The Multimedia Principle. In R. E. Mayer & L. Fiorella (Hrsg.), *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning* (S. 145–157). Cambridge University Press.
- Mayer, R. E. (2021b). The Multimedia Principle. In R. E. Mayer & L. Fiorella (Hrsg.), *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning* (S. 145–157). Cambridge University Press.
- Mayer, R. E. & Anderson, R. B. (1991). Animations need narrations: An experimental test of a dual-coding hypothesis. *Journal of Educational Psychology*, 83(4), 484–490. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.83.4.484>
- Mayer, R. E. & Fiorella, L. (Hrsg.). (2021). *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning*. Cambridge University Press.
- Mayer, R. E. & Moreno, R. (1998). A split-attention effect in multimedia learning: Evidence for dual processing systems in working memory. *Journal of Educational Psychology*, 90(2), 310–320.
- Mayer, R. E. & Moreno, R. (2002a). Aids to computer-based multimedia learning. *Learning and Instruction*, 12, 107–119.
- Mayer, R. E. & Moreno, R. (2002b). Animation as an Aid to Multimedia Learning. *Educational Psychology Review*, 14(1).
- Mayer, R. E. & Pilegard, C. (2005). Principles for Managing Essential Processing in Multimedia Learning: Segmenting, Pretraining, and Modality Principles. In R. E. Mayer

- (Hrsg.), *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning* (2. Aufl., S. 316–344). Cambridge University Press.
- Mayrberger, K. & Kumar, S. (2014). Mediendidaktik und Educational Technology. Zwei Perspektiven auf die Gestaltung von Lernumgebungen mit digitalen Medien. *Lernräume gestalten - Bildungskontexte vielfältig denken, Medien in der Wissenschaft*, 44–55.
- Mayring & P. (2010). *Qualitative Inhaltsanalyse. Grundlagen und Techniken* (2. Aufl.). Beltz-Verlag.
- Mehler-Bicher, A., Reiß, M. & Steiger, L. (2011). *Augmented Reality*. Oldenburg Wissenschaftsverlag. <https://doi.org/10.1524/9783486706888>
- Meiselwitz, G. & Sadera, W. A. (2008). Investigating the Connection between Usability and Learning Outcomes in Online Learning Environments. *MERLOT Journal of Online Learning and Teaching*, 4(2), 234–242.
- Miesera, S., Weidenhiller, P., Kühenthal, S. & Nerdel, C. (2018). E-Learning. Ernährungs- und Verbraucher*bildung. *Haushalt in Bildung & Forschung*, 4, 75–88. <https://doi.org/10.3224/hibifo.v7i4.06>
- Mikelskis-Seifert, S. (2002). *Die Entwicklung von Metakzepten zur Teilchenvorstellung bei Schülern. Untersuchung eines Unterrichts über Modelle mithilfe eines Systems multipler Repräsentationsebenen*. Logos Verlag.
- Mikelskis-Seifert, S. & Fischler, H. (2003). Die Bedeutung des Denkens in Modellen bei der Entwicklung von Teilchenvorstellungen – Stand der Forschung und Entwurf einer Unterrichtskonzeption. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 9, 75–88.
- Milgram, P. & Kishino, F. (1994). A TAXONOMY OF MIXED REALITY VISUAL DISPLAYS. *IEICE Transactions on Information Systems*, E77-D(12).
- Mishra, P. & Köhler, M. J. (2007). Technological Pedagogical Content Knowledge (TPCK): Confronting the Wicked Problems of Teaching with Technology. *Society for Information Technology & Teacher Education International Conference*, 2214–2226.
- Moosbrugger, H. & Kelava, A. (Hrsg.). (2012). *Springer-Lehrbuch. Testtheorie und Fragebogenkonstruktion* (2. Aufl.). Springer Berlin Heidelberg.
- Mortimer, C. E. (1980). *Chemie: Das Basiswissen der Chemie in Schwerpunkten* (3. neubearbeitete Auflage). Georg Thieme Verlag.
- Mounin, G. (1981). *A semiology of the sign system chemistry*. Diogenes-Verlag.
- Müller-Böling, D. & Müller, M. (1986). *Akzeptanzfaktoren der Bürokommunikation: Mit 8 Abb. u. 110 Tab. Fachberichte und Referate: Bd. 17*. Oldenbourg Verlag GmbH.
- Muñoz-Cristóbal, J. A., Rodríguez-Triana, M. J., Gallego-Lema, V., Arribas-Cubero, H. F., Asensi6o-Pérez, J. I. & Martínez-Monés, A. (2018). Monitoring for Awareness and Reflection in Ubiquitous Learning Environments. *International Journal of Human-*

- Computer Interaction*, 34(2), 146–165.
<https://doi.org/10.1080/10447318.2017.1331536>
- Mutlu-Bayraktar, D., Ozel, P., Altindis, F. & Yilmaz, B. (2022). Split-attention effects in multimedia learning environments: eye-tracking and EEG analysis. *Multimedia Tools and Applications*, 81, 8259–8282.
- Muuß-Merholz, J. (2019). Der große Verstärker. Spaltet die Digitalisierung die Bildungswelt. *Aus Politik und Zeitgeschichte*, 69, 4–10.
- Naumann, J., Richter, T. & Groeben, N. (2001). Validierung des INCOBI anhand eines Vergleichs von Anwendungsexperten und Anwendungsnovizen. *Zeitschrift für Pädagogische Psychologie*, 15, 219–232.
- Nerdel, C. (2017). *Grundlagen der Naturwissenschaftsdidaktik - Kompetenzorientiert und aufgabenbasiert für Schule und Hochschule*. Springer-Spektrum.
- Nerdel, C. & Kotzebue, L. von (2020). Digitale Medien im naturwissenschaftlichen Unterricht. Aufgaben für die Lehrerbildung. *Zeitschrift für Pädagogik*, 66, 159–173 (*Zeitschrift für Pädagogik* 66 (2020) 2, S. 159-173).
- Niegemann, H. M. (2008). *Kompendium multimediales Lernen*. Springer.
- Nielsen, J. (1993). *Usability engineering*. Morgan Kaufmann an imprint of Academic Press, a Harcourt Science and Technology Company.
- Nitz, S., Ainsworth, S. E., Nerdel, C. & Pechtl, H. (2014). Do student perceptions of teaching predict the development of representational competence and biological knowledge? *Learning and Instruction*, 31, 13–22.
- Nitz, S., Nerdel, C. & Pechtl, H. (2012). Entwicklung eines Erhebungsinstrumentes zur Erfassung der Verwendung von Fachsprache im Biologieunterricht. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 18, 117–140.
- Norris, S. P. & Phillips, L. M. (2003). How literacy in its fundamental sense is central to scientific literacy. *Science education*, 87(2), 224–240.
- Oliver-Hoyo, M. & Babilonia-Rosa, M. A. (2017). Promotion of Spatial Skills in Chemistry and Biochemistry Education at the College Level. *Journal of Chemical Education*, 94(8), 996–1006.
- Oser, F., Spychinger, M.: (2005). *Lernen ist schmerzhaft. Zur Theorie des Negativen Wissens und zur Praxis der Fehlerkultur*. Beltz-Verlag.
- Osterlind, S. J. (1998). *Constructing test items: Multiple-choice, constructed-response, performance, and other formats* (2. Aufl.). *Evaluation in education and human services*. Kluwer Academic Publishers.
- Padalkar, S. & Hegarty, M. (2015). Models as feedback: Developing representational competence in chemistry. *Journal of Educational Psychology*, 107(2), 451–467.
- Paivio, A. (1986). *Mental representations: A dual-coding approach*. Oxford University Press.

- Parchmann, I., Scheffel, L. & Stäudel, L. (2010). Struktur-Eigenschafts-Prinzipien: Roter Faden für den Chemieunterricht? *Unterricht Chemie*, 21(115), 8–11.
- Pedaste, M., Mäeots, M., Leijen, A. & Sarapuu, T. (2012). Improving Students' Inquiry Skills through Reflection and Self-Regulation Scaffolds. *Technology, Instruction, Cognition and Learning*, 9(1-2), 81–95.
- Peeters, H., Habig, S. & Fechner, S. (2023). Does Augmented Reality Help to Understand Chemical Phenomena during Hands-On Experiments?—Implications for Cognitive Load and Learning. *Multimodal Technologies and Interaction*, 7(2), 1–17.
- Peirce, C. S. (1906). Prolegomena to an Apology for Pragmatism. *Monist*, 16(4), 492–546. <https://doi.org/10.5840/monist190616436>
- Peperkorn, Y. & Schwedler, S. (2021). Simulationen im Chemieunterricht: Aufbau mentaler Modelle zu Energie. *Gesellschaft für die Didaktik der Chemie und Physik Band*, 41, 461–464.
- Petermann, K., Friedrich, J. & Oetken, M. (2008). „Das an Schülervorstellungen orientierte Unterrichtsverfahren“. *CHEMKON*, 15(3), 110–118.
- Petillion, R. J. & McNeil, W. S. (2020). Johnstone's triangle as a pedagogical framework for flipped-class instructional videos in introductory chemistry. *Journal of Chemical Education*, 97(6), 1536–1542.
- Petko, D., Döbeli Honegger, B. & Prasse, D. (2018). Digitale Transformation in Bildung und Schule: Facetten, Entwicklungslinien und Herausforderungen für die Lehrerinnen- und Lehrerbildung. *Beiträge zur Lehrerinnen- und Lehrerbildung*, 36(2), 157–174. <https://doi.org/10.25656/01:17094>
- Pfeifer, P., Lutz, B. & Bader, H. J. (2002). *Konkrete Fachdidaktik Chemie*. Oldenbourg Verlag GmbH.
- Pfundt, H. (1981). Das Atom - letztes Teilstück oder erster Aufbaustein? Zu den Schülervorstellungen, die sich Schüler vom Aufbau der Stoffe machen. *Chimica didactica*, 7, 75–94.
- Probst, C., Fetzer, D., Lukas, S. & Huwer, J. (2022). Effekte von Augmented Reality (AR) zur Visualisierung eines dynamischen Teilchenmodells – virtuelle Modelle zum Anfasse. *CHEMKON*, 29(4), 164–170.
- Probst, C., Lukas, S. & Huwer, J. (2020). COVID19: DISTANCE LEARNING IN TIMES OF CRISIS DIGITAL TECHNOLOGIES AND RESOURCES FOR LEARNING UNDER LOCKDOWN PROMOTING HOMESCHOOLING IN CHEMISTRY EDUCATION WITH AUGMENTED REALITY. In L. Gómez Chova, A. López Martínez & I. Candel Torres (Hrsg.), *ICERI Proceedings, ICERI2020 Proceedings* (S. 2023–2031). IATED.
- Probst, C., Wendt, D., Lukas, S. & Huwer, J. (2021). Mit Hilfe von Augmented Reality das Schalenmodell einführen und erarbeiten. In N. Graulich, J. Huwer & A. Banerji

- (Hrsg.), *Digitalisation in Chemistry Education: Digitales Lehren und Lernen an Hochschule und Schule im Fach Chemie* (1. Aufl., S. 109–120).
- Prümper, J. (2008). *ISONORM 9241/110-S: Beurteilung von Software auf Grundlage der Internationalen Energie-Norm DIN EN ISO 9241-110*.
- Puentedura, R. R. (2006). *Transformation, technology, and education in the state of Maine*.
<http://www.hippasus.com/rrpweblog/archives/000095.html>
- Radu, I. (2014). Augmented reality in education: a meta-review and cross-media analysis. *Personal and Ubiquitous Computing*, 18, 1533–1543.
- Radu, I. & Schneider, B. (2019). What Can We Learn from Augmented Reality (AR)? In S. Brewster, G. Fitzpatrick, A. Cox & V. Kostakos (Hrsg.), *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (S. 1–12). ACM.
- Raita, E. & Oulasvirta, A. (2011). Too good to be bad: Favorable product expectations boost subjective usability ratings. *Interacting with Computers*, 23(4), 363–371.
- Rau, M. A. (2017a). Conditions for the Effectiveness of Multiple Visual Representations in Enhancing STEM Learning. *Educational Psychology Review*, 29(4), 717–761.
<https://doi.org/10.1007/s10648-016-9365-3>
- Rau, M. A. (2017b). Do Knowledge-Component Models Need to Incorporate Representational Competencies? *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, 27(2), 298–319. <https://doi.org/10.1007/s40593-016-0134-8>
- Rau, M. A. (2020). Cognitive and Socio-Cultural Theories on Competencies and Practices Involved in Learning with Multiple External Representations. In P. van Meter, A. List, D. Lombardi & P. Kendeou (Hrsg.), *Educational psychology handbook series: 2020: 1. Handbook of learning from multiple representations and perspectives* (S. 17–32). Routledge, Taylor & Francis Group.
- Redecker, C. (2017). European Framework for the Digital Competence of Educators: DigCompEdu. *JRC Research Reports JRC107466, Joint Research Centre (Seville site)*.
- Reid, N. (2021). *The Johnstone Triangle*. Royal Society of Chemistry.
- Reinfried, S., Mathis, C. & Ulrich, N. (2009). Das Modell der Didaktischen Rekonstruktion. Eine innovative Methode zur fachdidaktischen Erforschung und Entwicklung von Unterricht. *Beiträge zur Lehrerbildung*, 27(3), 404–414.
- Reinfried, S., Mathis, C. & Kattmann, U. (2009). Das Modell der Didaktischen Rekonstruktion. Eine innovative Methode zur fachdidaktischen Erforschung und Entwicklung von Unterricht. *Beiträge zur Lehrerbildung*, 27(3), 404–414.
<https://doi.org/10.25656/01:13710>

- Reinhold, F. (2019). *Wirksamkeit von Tablet-PCs bei der Entwicklung des Bruchzahlbegriffs aus mathematikdidaktischer und psychologischer Perspektive*. Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Reinmann, G., Hartung, S. & Florian, A. (2014). Akademische Medienkompetenz im Schnittfeld von Lehren, Lernen, Forschen und Verwalten. *Grundbildung Medien in pädagogischen Studiengängen*, 1, 319–332.
- Reinmann-Rothmeier, G. & Mandl, H. (1998). Wenn kreative Ansätze versanden: Implementierungen als verkannte Aufgabe. *Unterrichtswissenschaft*, 26, 292–311.
- Reinmann-Rothmeier, G. & Mandl, H. (2001). Unterrichten und Lernumgebungen gestalten. In A. Krapp & B. Weidenmann (Hrsg.), *Pädagogische Psychologie. Ein Lehrbuch* (S. 601–646). Beltz.
- Reinmann-Rothmeier, G., Mandl, H. & Prenzel, M. (1997). Qualitätssicherung bei der multimedialen Lernumgebung. In H. F. Friedrich (Hrsg.), *Grundlagen der Weiterbildung. Multimediale Lernumgebungen in der betrieblichen Weiterbildung: Gestaltung, Lernstrategien und Qualitätssicherung* (S. 267–333). Luchterhand.
- Renkl, A. (1997). Learning from worked-out examples: A study on individual differences. *Cognitive Science*, 21, 1–29.
- Rey, G. D. (2009). *E-Learning: Theorien, Gestaltungsempfehlungen und Forschung*. Huber.
- Richter, M. & Flückiger, M. D. (2016). *Usability und UX kompakt*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-49828-6>
- Riedel, E. (2010). *Allgemeine und Anorganische Chemie* (10. Aufl.). Walter De Gruyter GmbH.
- Rincke, K. (2010). Alltagssprache, Fachsprache und ihre besondere Bedeutung für das Lernen. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 16, 235–260.
- Rodić, D. D., Rončević, T. N. & Segedinac, M. D. (2018). The Accuracy of Macro-Submicro-Symbolic Language of Future Chemistry Teachers. *Acta chimica Slovenica*, 65(2), 394–400.
- Roelcke, T. (2021). Fachsprachliche Vielfalt im Gegenwartsdeutschen. *Lublin Studies in Modern Languages and Literature*, 45(1), 51.
- Romrell, D., Kidder, L. C. & Wood, E. (2014). The SAMR Model as a Framework for Evaluating mLearning. *Online Learning Journal*, 18(2).
- Rost, J. (1998). Drei Thesen zum Konzept qualitativer Forschungsmethoden. *Zeitschrift für die Didaktik der Chemiewissenschaften*.
- Rost, J. (2004). *Lehrbuch Testtheorie - Testkonstruktion* (2. Aufl.). *Psychologie Lehrbuch*. Huber.

- Ryan, R. M. & Deci, E. L. (2000). Self-determination theory and the facilitation of intrinsic motivation, social development, and well-being. *The American psychologist*, 55(1), 68–78. <https://doi.org/10.1037/0003-066X.55.1.68>
- Sailer, M., Murböck, J. & Fischer, F. (2017). *Digitale Bildung an bayerischen Schulen – Infrastruktur, Konzepte, Lehrerbildung und Unterricht*. vbw.
- Sandmann, A. (2014). Lautes Denken – die Analyse von Denk-, Lern- und Problemlöseprozessen. In D. Krüger, I. Parchmann & H. Schecker (Hrsg.), *Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung* (S. 179–188). Springer Berlin Heidelberg.
- Sandmann, A., Hosenfeld, M., Mackensen, I. & Lind, G. (2002). Paraphrasieren, Schlussfolgern, Bewerten - Strategien des Lernens mit Beispielaufgaben bei Experten und Novizen in Biologie. In R. Klee & H. Bayrhuber (Hrsg.), *Lehr- und Lernforschung in der Biologiedidaktik* (S. 131–144). StudienVerlag.
- Santos, V. C. & Arroio, A. (2016). The representational levels: Influences and contributions to research in chemical education. *Journal of Turkish Science Education*, 13(1), 3–18.
- Sauro, J. (2011). *A Practical Guide to the System Usability Scale (SUS): Background, Benchmarks & Best Practices*. Measuring Usability LLC.
- Schallehn, A. (2004). *Akzeptanz und Motivation beim selbstregulierten Lernen unter Einsatz von neuen Medien in der berufsbegleitenden Weiterbildung* [Inaugural-Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades des Doktorgrades (Dr. rer. pol.)]. Universität Kassel.
- Scheerer, F. (2021). *Interaktion mit der MBP IoT-Plattform mittels der Microsoft HoloLens* [Masterarbeit]. Universität Stuttgart, Stuttgart.
- Scheiter, K. (2021). Lernen und Lehren mit digitalen Medien: Eine Standortbestimmung [Technology-enhanced learning and teaching: an overview]. *Zeitschrift für Erziehungswissenschaft: ZfE*, 24(5), 1039–1060.
- Scheiter, K. & Eitel, A. (2015). Signals foster multimedia learning by supporting integration of highlighted text and diagram elements. *Learning and Instruction*, 36, 11–26.
- Scheiter, K., Richter, J. & Renkl, A. (2020). Multimediales Lernen: Lehren und Lernen mit Texten und Bildern. In H. Niegemann & A. Weinberger (Hrsg.), *Handbuch Bildungstechnologie: Konzeption und Einsatz digitaler Lernumgebungen* (S. 31–56). Springer.
- Scherp, A. & Schlattmann, M. (2002). *Virtuelle Labore für den naturwissenschaftlichen (Schul-) Unterricht*.
- Schlummer, P., Abazi, A., Borkamp, R., Lauströer, J., Pernice, W., Schuck, C., Schulz-Schaeffer, R., Heusler, S. & Laumann, D. (2021). *Physikalische Modelle erfahrbar machen: - Mixed Reality im Praktikum -*. Didaktik der Physik.

- Schmalhofer, V. R. (1996). *The effects of biotic and abiotic factors on predator-prey interactions in old-field flower-head communities*. Rutgers The State University of New Jersey, School of Graduate Studies.
- Schmalstieg, D. & Höllerer, T. (2016). *Augmented Reality – Principles and Practice*. Addison-Wesley.
- Schmeck, A. (2011). *Visualisieren naturwissenschaftlicher Sachverhalte. Der Einsatz von vorgegebenen und selbst generierten Visualisierungen als Textverstehenshilfen beim Lernen aus naturwissenschaftlichen Sachtexten* [Dissertation]. Universität Duisburg-Essen, Essen.
- Schmid, U., Goertz, L., Behrens, J. & Bertelsmann Stiftung. (2017). *Monitor Digitale Bildung : Die Schulen im digitalen Zeitalter*. <https://doi.org/10.11586/2017041>
- Schmidt, A. (1993). *Schematische Darstellung des Hochofenprozesses* [Abbildung]. <https://de.m.wikipedia.org/wiki/Datei:Hochofenprozess.PNG>
- Schmidt, S. (2010). *Didaktische Rekonstruktion des Basiskonzepts 'Stoff-Teilchen' für den Anfangsunterricht nach Chemie im Kontext*. Carl von Ossietzky Universität Oldenburg.
- Schmiemann, P. & Lücken, M. (2014). Validität – Misst mein Test, was er soll? In D. Krüger, I. Parchmann & H. Schecker (Hrsg.), *Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung* (S. 107–118). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-37827-0_9
- Schnitker, J. (2016). Das Unsichtbare sichtbar machen: Chemie lehren mit Simulationen auf der Teilchenebene. *MNU Journal*, 6, 392–399.
- Schnotz, W. (2001a). Lernen aus Beispielen: Ein handlungstheoretischer Rahmen (Kommentar). *Unterrichtswissenschaft*, 29(1), 88–95.
- Schnotz, W. (2001b). Wissenserwerb mit Multimedia. *Unterrichtswissenschaft*, 29(4), 292–318.
- Schnotz, W. (2002). Towards an Integrated View of Learning From Text and Visual Displays. *Educational Psychology Review*, 14(1), 101–120.
- Schnotz, W. (2005). An Integrated Model of Text and Picture Comprehension. In R. E. Mayer (Hrsg.), *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning* (2. Aufl., S. 49–70). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511816819.005>
- Schnotz, W. (2011). *Pädagogische Psychologie*. Beltz-Verlag.
- Schnotz, W. (2014). An integrated model of text and picture comprehension. In R. E. Mayer (Hrsg.), *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning* (2. Aufl., S. 72–103). Cambridge University Press.
- Schnotz, W. & Bannert, M. (2003). Construction and interference in learning from multiple representation. *Learning and Instruction*, 13(2), 141–156.

- Schnotz, W., Zink, T. & Pfeiffer, M. (1996). Visualisierungen im Lehr-Lern-Prozeß. *Zeitschrift für Pädagogik*, 42(2), 193–213.
- Schreiber, S. (Hrsg.). (2013). *Alle Teilchen in Bewegung - eine Einführung ins Teilchenmodell: Atombau und Periodensystem*. RAABE.
- Schröder, N. L. & Cenkci, A. T. (2018). Spatial Contiguity and Spatial Split-Attention Effects in Multimedia Learning Environments: a Meta-Analysis. *Educational Psychology Review*, 30(3), 679–701. <https://doi.org/10.1007/s10648-018-9435-9>
- Schunk, A. & Wich, P. (2003). Multimediale Baukästen für den Chemieunterricht. *Nachrichten aus der Chemie*, 51(11), 1156–1158.
- Schütz, A. & Lustenberger, P. I. (2020). 3D-Moleküle mit einer App visualisieren. *Transfer*, 1.
- Schwanke, H. & Trefzger, T. (2020). Augmented Reality in Schulversuchen der E-Lehre in der Sekundarstufe I. In DPG (Vorsitz), *Didaktik Der Physik - Beiträge Zur DPG-Frühjahrstagung*, Bonn.
- Schwanke, H. & Trefzger, T. (2021). Entwicklung von AR-Applikationen für die Elektrizitätslehre der Sekundarstufe I. In DPG (Vorsitz), *Didaktik Der Physik - Beiträge Zur DPG-Frühjahrstagung*, virtuell.
- Schwarzer, R. (1994). Optimistische Kompetenzerwartung: Zur Erfassung einer personellen Bewältigungsressource [Generalized self-efficacy: Assessment of a personal coping resource]. *Diagnostica*, 40(2), 105–123.
- Schweiger, M., Wimmer, J., Chaudhry, M., Alves Siegle, B. & Xie, D. (2022). Lernerfolg in der Schule durch Augmented und Virtual Reality? *MedienPädagogik: Zeitschrift für Theorie und Praxis der Medienbildung*, 47, 1–25. <https://doi.org/10.21240/mpaed/47/2022.04.01.X>
- Seibert, J., Luxenburger-Becker, H., Marquardt, M., Lang, V., Perels, F., W. M. Kay, C. & Huer, J. (2020). Multitouch Experiment Instruction for a Better Learning Outcome in Chemistry Education. *World Journal of Chemical Education*, 8(1), 1–8.
- Seufert, S., Guggemos, J. & Tarantini, E. (2018). Digitale Transformation in Schulen – Kompetenzanforderungen an Lehrpersonen. *Beiträge zur Lehrerinnen- und Lehrerbildung : Zeitschrift zu Theorie und Praxis der Aus- und*, 36(2), 175–193. <https://doi.org/10.25656/01:17096>
- Seufert, T. (2003). Supporting coherence formation in learning from multiple representations. *Learning and Instruction*, 13(2), 227–237.
- Shehab, S. S. & BouJaoude, S. (2017). Analysis of the Chemical Representations in Secondary Lebanese Chemistry Textbooks. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 15(5), 797–816. <https://doi.org/10.1007/s10763-016-9720-3>
- Shulman, L. S. (1986). Those Who Understand: Knowledge Growth in Teaching. *Educational Researcher*, 15(2), 4. <https://doi.org/10.2307/1175860>

- Shulman, L. S. (1987). Knowledge and Teaching: Foundations of the New Reform. *Harvard Educational Review*, 57(1), 1–23.
<https://doi.org/10.17763/haer.57.1.j463w79r56455411>
- Sieve, B., Ulrich, N. & Schanze, S. (2014). Vom Lehrerwerkzeug zum Werkzeug für Lernende: Wie bekommen Lehrer Perspektiven für die Nutzung interaktiver Whiteboards. *Comp.+Unterricht*, 24(93), 52–53.
- Signal Garden Research. (2023). *AR Atom Visualizer for ARCore (Version 2.1.1) [Mobile app]*. Google Play. <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.signalgarden.atomvisualizer&hl=en&gl=US&pli=1>
- Sim Siew Li, W., Arshad, M. & Yusof, A. (2014). Application of mutiplerepresentation levels in redox reactions among tenth grade chemistry teachers. *Journal of Turkish Science Education*, 11(3), 35–52.
- Simon, B. (2001). *E-Learning an Hochschulen. Gestaltungsräume und Erfolgsfaktoren von Wissensmedien*. Josef Eul Verlag.
- Slater, M. & Wilbur, S. (1997). A Framework for Immersive Virtual Environments (FIVE): Speculations on the Role of Presence in Virtual Environments. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 6(6), 603–616. <https://doi.org/10.1162/pres.1997.6.6.603>
- Speer, N. M. (2008). Connecting beliefs and practices. A fine-grained analysis of a college mathematics teacher's collection of beliefs and their relationship to his instructional practices. *Cognition and Instruction*, 26, 218–267.
- Srinivasan, S. & Crooks, S. (2006). Effects of Concreteness and Contiguity on Learning from Computer-based Periodic Table. In C. Crawford, R. Carlsen, K. McFerrin, J. Price, R. Weber & D. Willis (Hrsg.), *SITE 2006--Society for Information Technology & Teacher Education International Conference (S. 1800–1805)*. Association for the Advancement of Computing in Education (AACE).
- Staatsinstitut für Schulqualität und Bildungsforschung. (2017). *Kompetenzrahmen zur Medienbildung an bayerischen Schulen*.
- Staatsinstitut für Schulqualität und Bildungsforschung. (2023a). *Ergänzende Informationen zum LehrplanPLUS: Grundschule, Heimat- und Sachunterricht, Jahrgangsstufen 1/2 - Das Stoff-Teilchen-Konzept*.
- Staatsinstitut für Schulqualität und Bildungsforschung. (2023b). *Ergänzende Informationen zum LehrplanPLUS: Gymnasium, Chemie, Jahrgangsstufen 8 (NTG), 9 (SG, MuG, WSG) - Häufig beobachtbare Fehlvorstellungen zum Teilchenkonzept*.
- Staatsinstitut für Schulqualität und Bildungsforschung. (2023c). *Ergänzende Informationen zum LehrplanPLUS: Gymnasium, Chemie, Jahrgangsstufen 8 (NTG), 9 (SG, MuG, WSG) - Kernaussagen zum Teilchenmodell*.

- Staatsinstitut für Schulqualität und Bildungsforschung München. (2023a). *Ergänzende Informationen zum LehrplanPLUS: Gymnasium, Chemie, Jahrgangsstufen 8 (NTG), 9 (SG, MuG, WSG)*.
- Staatsinstitut für Schulqualität und Bildungsforschung München. (2023b). *Lehrplan Plus Bayern: Realschule, Chemie 9 (I)*. <https://www.lehrplanplus.bayern.de/fachlehrplan/realschule/9/chemie/wpfg1>
- Staatsinstitut für Schulqualität und Bildungsforschung München. (2023c). *LehrplanPLUS*. <https://www.lehrplanplus.bayern.de/fachlehrplan/gymnasium/9/chemie/ch-ntg>
- Stachowiak, H. (1973). *Allgemeine Modelltheorie*. Springer.
- Stachowiak, H. (Hrsg.). (1980). *Forschen und Lernen: Bd. 4. Modelle und Modelldenken im Unterricht: Anwendungen der allgemeinen Modelltheorie auf die Unterrichtspraxis*. Klinkhardt.
- Stalder, F. (2016). *Kultur der Digitalität*. Suhrkamp Verlag.
- Stalder, F. (2018). Herausforderungen der Digitalität jenseits der Technologie. *Synergie–Fachmagazin für Digitalisierung in der Lehre*, 5, 8–15.
- Stark, R., Hinkofer, L. & Mandl, H. (2001). *Beispielbasiertes Lernen im Bereich Buchführung: Einfluss instruktionaler Erklärungen und multipler Perspektiven auf Lernverhalten und Lernerfolg* [Forschungsbericht Nr. 134]. Ludwig Maximilians Universität München, München.
- Stebler, R. (1999). *Eigenständiges Problemlösen. Zum Umgang mit Schwierigkeiten beim individuellen und paarweisen Lösen mathematischer Problemgeschichten*. Peter Lang.
- Steffensky, M., Parchmann, I. & Schmidt, S. (2005). Alltagsvorstellungen und chemische Erklärungskonzepte: "Die Teilchen saugen das Aroma aus dem Tee". *Chemie in unserer Zeit*, 39(4), 274–278.
- Stegmann, K. (2020). Effekte digitalen Lernens auf den Wissens- und Kompetenzerwerb in der Schule. Eine Integration metaanalytischer Befunde. *Zeitschrift für Pädagogik*, 66(2), 174–190. <https://doi.org/10.25656/01:25790> (Zeitschrift für Pädagogik 66 (2020) 2, S. 174-190).
- Steinbuch, K. (1977). Denken in Modellen. In G. Trommer (Hrsg.), *Denken in Modellen* (S. 10–17). Westermann.
- Stieff, M. (2011a). Improving representational competence using molecular simulations embedded in inquiry activities. *JOURNAL OF RESEARCH IN SCIENCE TEACHING*, 48(10), 1137–1158.
- Stieff, M. (2011b). When is a molecule three dimensional? A task-specific role for imagistic reasoning in advanced chemistry. *Science education*, 95(2), 310–336.

- Stolzenberger, C., Wolf, N., Böhm, D. & Trefzger, T. (2019). Augmented Reality in der Lehramtsausbildung. In C. Maurer (Vorsitz), *Naturwissenschaftliche Bildung als Grundlage für berufliche und gesellschaftliche Teilhabe. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Jahrestagung in Kiel 2018*.
- Stull, A. T., Gainer, M., Padalkar, S. & Hegarty, M. (2016). Promoting Representational Competence with Molecular Models in Organic Chemistry. *Journal of Chemical Education*, 93(6), 994–1001.
- Suits, J. P. & Sanger, M. J. (2013). Dynamic Visualizations in Chemistry Courses. In J. P. Suits & M. J. Sanger (Hrsg.), *ACS symposium series. Pedagogic Roles of Animations and Simulations in Chemistry Courses* (Bd. 1142, S. 1–13). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/bk-2013-1142.ch001>
- Sweller, J. (2011). Cognitive Load Theory. In J. P. Mestre & B. H. Ross (Hrsg.), *Psychology of Learning and Motivation. The psychology of learning and motivation: Cognition in education* (Bd. 55, S. 37–76). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-387691-1.00002-8>
- Sweller, J., van Merriënboer, J. J. G. & Paas, F. G. W. C. (1998). Cognitive Architecture and Instructional Design. *Educational Psychology Review*, 10(3), 251–296.
- Taber, K. S. (2013). Revisiting the chemistry triplet: drawing upon the nature of chemical knowledge and the psychology of learning to inform chemistry education. *Chemistry Education Research and Practice*, 14(2), 156–168.
- Talanquer, V. (2011). Macro, Submicro, and Symbolic: The many faces of the chemistry “triplet”. *International Journal of Science Education*, 33(2), 179–195.
- Tappe, E.-H. (2019). Prädiktoren der Intention zum didaktischen Einsatz von digitalen Medien im Unterricht - Überführung der Unified Theory of Acceptance and Use of Technology (UTAUT) in ein schulisches Untersuchungssetting. In T. Knaus (Hrsg.), *Forschungswerkstatt Medienpädagogik. Profekt - Theorie - Methode* (S. 999–1027). kopaed.
- Tasker, R. & Dalton, R. (2006). Research into practice: visualisation of the molecular world using animations. *Chemistry Education Research and Practice*, 7(2), 141–159.
- Teichrew, A. & Erb, R. (2018). Implementierung modellbildender Lernangebote in das physikalische Praktikum. In DPG (Vorsitz), *Didaktik Der Physik - Beiträge Zur DPG-Frühjahrstagung*, Würzburg.
- Tepner, O., Borowski, A., Fischer, H. E., Jüttner, M., Kirschner, S., Leutner, D., Neuhäus, B. J., Sandmann, A., Sumfleth, E., Thillmann, H., Wirth, J. & Witner, S. (2012). Modell zur Entwicklung von Testitems zur Erfassung des Professionswissens von Lehrkräften in den Naturwissenschaften. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 18, 7–28.

- Tepner, O. & Dollny, S. (2014). Entwicklung eines Testverfahrens zur Analyse fachdidaktischen Wissens. In D. Krüger, I. Parchmann & H. Schecker (Hrsg.), *Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung* (S. 311–323). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-37827-0_25
- Terzer, E., Hartig, J. & Upmeyer zu Belzen, A. (2013). Systematische Konstruktion eines Tests zu Modellkompetenz im Biologieunterricht unter Berücksichtigung von Gütekriterien. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 19, 51–76.
- Thees, M., Kapp, S., Strzys, M. P., Beil, F., Lukowicz, P. & Kuhn, J. (2020). Effects of augmented reality on learning and cognitive load in university physics laboratory courses. *Computers in Human Behavior*, 108, 106316. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2020.106316>
- Thees, M., Kapp, S., Strzys, M. P., Bell, F., Lukowicz, P. & Kuhn, J. (2020). Using Smartglasses as an efficient augmented reality tool for enhancing university STEM laboratory courses—Theoretical derivations and empirical findings from a multimedia learning perspective. *Computers in Human Behavior*, 102.
- Thiele, M., Mikelskis-Seifert, S. & Wünscher, T. (2005). Modellieren-Schlüsselfähigkeit für physikalische Forschungs- und Lernprozesse. *Physik und Didaktik in Schule und Hochschule*, 1(4), 30–46.
- Thurlings, M., Evers, A. T. & Vermeulen, M. (2015). Toward a model of explaining teachers' innovative behavior: A literature review. *Review of Educational Research*, 85, 430–471.
- Thyssen, C., Hoffmann, C., Probst, C. & Huwer, J. (2020). Augmented Reality - unterrichten mit erweiterter Realität. *NiU Biologie*, 455, 41–44.
- Tiemann, R. & Körbs, C. (2014). Die Fragebogenmethode, ein Klassiker der empirischen didaktischen Forschung. In D. Krüger, I. Parchmann & H. Schecker (Hrsg.), *Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung* (S. 283–295). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-37827-0_23
- Treagust, D. F., Chittleborough, G. & Mamiala, T. (2003). The role of submicroscopic and symbolic representations in chemical explanations. *International Journal of Science Education*, 25(11), 1353–1368.
- Treagust, D. F., Chittleborough, G. D. & Mamiala, T. L. (2004). Students' Understanding of the Descriptive and Predictive Nature of Teaching Models in Organic Chemistry. *Science education*, 34, 1–20.
- Tricot, A. & Sweller, J. (2014). Domain-specific knowledge and why teaching generic skills does not work. *Educational Psychology Review*, 26, 265–283.

- Tschiersch, A., Krug, M., Huwer, J. & Banerji, A. (2021). ARbeiten mit erweiterter Realität im Chemieunterricht – ein Überblick über Augmented Reality in naturwissenschaftlichen Lehr-Lernszenarien. *CHEMKON*, 28(6), 241–244.
- Tsui, C.-Y. & Treagust, D. F. (2013). Introduction to Multiple Representations: Their Importance in Biology and Biological Education. In D. F. Treagust & C.-Y. Tsui (Hrsg.), *Models and Modeling in Science Education. Multiple representations in biological education* (S. 3–18). Springer.
- Tulodziecki, G. (2010). Standards für die Medienbildung als eine Grundlage für die empirische Erfassung von Medienkompetenz-Niveaus. In B. Herzig, D. M. Meister, H. Moser & H. Niesyto (Hrsg.), *Jahrbuch Medienpädagogik 8* (S. 81–101). VS Verlag für Sozialwissenschaften. https://doi.org/10.1007/978-3-531-92135-8_5
- Turro, N. J. (1986). Geometrisches und topologisches Denken in der Organischen Chemie. *Angewandte Chemie*, 98(10), 872–892. <https://doi.org/10.1002/ange.19860981004>
- Tversky, B., Morrison, J. B. & Bétrancourt, M. (2002). Animation: can it facilitate? *International journal of human-computer studies*, 57(4), 247–262.
- Ulrich, N., Richter, J., Scheiter, K. & Schanze, S. (2014). eChemBook: Ein interaktives, digitales Schulbuch für den Chemieunterricht. *Das elektronische Schulbuch: Fachdidaktische Anforderungen und Lösungsvorschläge der Informatik*, 15.
- Upmeier zu Belzen, A. & Krüger, D. (2010). Modellkompetenz im Biologieunterricht. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 16, 41–57.
- Urban, D. & Mayerl, J. (2011). *Regressionsanalyse: Theorie, Technik und Anwendung* (4. Aufl.). *Lehrbuch*. VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- Valtonen, T., Sointu, E. T., Mäkitalo-Siegl, K. & Kukkonen, J. (2015). Developing a TPACK measurement instrument for 21st century pre-service teachers. *International journal of media, technology and lifelong learning*, 11(2), 87–100.
- van Dijk, T. A. & Kintsch, W. (1983). *Strategies of discourse comprehension*. Academic Press.
- van Driel, J. H. & Verloop, N. (1999). Teachers' knowledge of models and modelling in science. *International Journal of Science Education*, 21(11), 1141–1199.
- van Driel, J. H. & Verloop, N. (2002). Experienced teachers' knowledge of teaching and learning of models and modelling in science education. *International Journal of Science Education*, 24(12), 1255–1272.
- Venkatesh, V. (2000). Determinants of perceived ease of use: Integrating perceived behavioral control, computer anxiety and enjoyment into the Technology Acceptance Model. *Information Systems Research*, 11, 342–365.
- Venkatesh, V. & Davis, F. D. (2000). A Theoretical Extension of the Technology Acceptance Model: Four Longitudinal Field Studies. *Management Science*, 46(2), 186–204.

- Vogelsang, C., Finger, A., Laumann, D. & Thyssen, C. (2019). Vorerfahrungen, Einstellungen und motivationale Orientierungen als mögliche Einflussfaktoren auf den Einsatz digitaler Werkzeuge im naturwissenschaftlichen Unterricht. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 25(1), 115–129.
- Vollmer, G. (1990). Didaktische Konsequenzen der Wissenschaftstheorie. *Praxis der Naturwissenschaften - Physik*, 39(2), 17–20.
- Vosniadou, S. (1994). Capturing and modeling the process of conceptual change. *Learning and Instruction*, 4(1), 45–69.
- Waffner, B. (2020). Unterrichtspraktiken, Erfahrungen und Einstellungen von Lehrpersonen zu digitalen Medien in der Schule. In A. Wilmers, C. Anda, C. Keller & M. Rittberger (Hrsg.), *Bildung im digitalen Wandel: Die Bedeutung für das pädagogische Personal und für die Aus- und Fortbildung* (S. 57–102). Waxmann Verlag GmbH.
- Walpuski, M. & Ropohl, M. (2014). Statistische Verfahren für die Analyse des Einflusses von Aufgabenmerkmalen auf die Schwierigkeit. In D. Krüger, I. Parchmann & H. Schecker (Hrsg.), *Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung* (S. 385–398). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-37827-0_30
- Weidenmann, B. (1988). *Psychische Prozesse beim Verstehen von Bildern* (1. Aufl.). Huber.
- Weidle, R. & Wagner, A. C. (1994). Die Methode des Lauten Denkens. In G. Huber & H. Mandl (Hrsg.), *Verbale Daten* (S. 81–103). Beltz.
- West, M. & Vosloo, S. (2013). *Directrices de la UNESCO para las políticas de aprendizaje móvil. Acceso abierto*. UNESCO.
- Winde, P. (1977). Die black-box-Methode. In G. Schaefer, G. Trommer & K. Wenk (Hrsg.), *Denken in Modellen* (1. Aufl., S. 122–139). Westermann.
- Wirtz, M. A. & Caspar, F. (2002). *Beurteilerübereinstimmung und Beurteilerreliabilität: Methoden zur Bestimmung und Verbesserung der Zuverlässigkeit von Einschätzungen mittels Kategoriensystemen und Ratingskalen*. Hogrefe Verlag für Psychologie.
- Witt, C. de & Czerwionka, T. (2013). *Mediendidaktik* (2. Aufl.). wbv Media GmbH & Company KG.
- Wolf, M., Söbke, H. & Baalsrud Hauge, J. (2020). Designing Augmented Reality Applications as Learning Activity. In V. Geroimenko (Hrsg.), *Springer Series on Cultural Computing. Augmented Reality in Education* (S. 23–43). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-42156-4_2
- Wu, H.-K., Krajcik, J. S. & Soloway, E. (2001). Promoting Understanding of Chemical Representations: Students' Use of a Visualization Tool in the Classroom. *JOURNAL OF RESEARCH IN SCIENCE TEACHING*, 38(7), 821–842.

- Wu, H.-K., Lee, S. W.-Y., Chang, H.-Y. & Liang, J.-C. (2013). Current status, opportunities and challenges of augmented reality in education. *Computers & Education*, 62, 41–49. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2012.10.024>
- Wyss, C., Bühner, W., Furrer, F., Degonda, A. & Hiss, J. A. (2021). Innovative Teacher Education with the Augmented Reality Device Microsoft HoloLens—Results of an Exploratory Study and Pedagogical Considerations. *Multimodal Technologies and Interaction*, 5(8), 45.
- Wyss, C., Furrer, F., Degonda, A. & Bühner, W. (2022). Augmented Reality in der Hochschullehre. *MedienPädagogik*, 47, 118–137.
- Yoon, S., Anderson, E., Lin, J. & Elinich, K. (2017). How Augmented Reality Enables Conceptual Understanding of Challenging Science Content. *Educational Technology & Society*, 20(1), 156–168.
- Yore, L. D. & Hand, B. (2010). Epilogue: Plotting a research agenda for multiple representations, multiple modality, and multimodal representational competency. *Research in Science Education*, 40(1), 93–101.
- Zacharia, Z. C., Manoli, C., Xenofontos, N., Jong, T. de, Pedaste, M., van Riesen, S. A. N., Kamp, E. T., Mäeots, M., Siiman, L. & Tsourlidaki, E. (2015). Identifying potential types of guidance for supporting student inquiry when using virtual and remote labs in science: a literature review. *Educational Technology Research and Development*, 63(2), 257–302. <https://doi.org/10.1007/s11423-015-9370-0>
- Zhao, F., Schnotz, W., Wagner, I. & Gaschler, R. (2020). Texts and pictures serve different functions in conjoint mental model construction and adaption. *Memory & cognition*, 48(1), 69–82.
- Ziegler, M. & Bühner, M. (2012). *Grundlagen der Psychologischen Diagnostik*. VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- ZPG Chemie. (2016). *Glossar: Stoff - Teilchen - Struktur - Eigenschaften*.
- Zumbach, J., Maresch, G., Fleischer, T. & Strahl, A. (Hrsg.). (2020). *Salzburger Beiträge zur Lehrer/innen/bildung: Bd. 8. Neue Impulse in der Naturwissenschaftsdidaktik* (1. Aufl.). Waxmann.
- Zydney, J. M. & Warner, Z. (2016). Mobile apps for science learning: Review of research. *Computers & Education*, 94, 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2015.11.001>

ANHANG

A.1 Vorstudie

A.1.1 Material

A.1.1.1 Prätest

Fragebogen

1 Herzlich Willkommen

Herzlich Willkommen zur Pilotierung einer AR-Lernumgebung zum Thema Elektrolyse von Zinkiodid

2 Einführung

Liebe*r Untersuchungsteilnehmer*in,

ich freue mich, dass Sie an der AR-Studie im Rahmen meines Promotionsprojekts teilnehmen möchten. Die Studie wird von der Professur für Fachdidaktik L Education unter der Leitung von mir, Melanie Ripsam, und Prof. Dr. Claudia Nerdel durchgeführt. Im Folgenden möchte ich Sie über die Ziele und den Ablauf

Studienziel

Das Ziel der Erhebung ist es, die **Tauglichkeit einer AR-Lernumgebung für den lernwirksamen Einsatz im Chemieunterricht bzw. in universitären** bewerten, Ihre **Einstellungen sowie Selbstwirksamkeitserwartungen zu digitalen Medien und Augmented Reality** zu erheben sowie Ihren **Umgang Fachsprache hinsichtlich der Stoff- und Teilchenebenen** zu erfassen.

Ablauf

Als (angehende) Chemielehrkraft, Naturwissenschaftler*in bzw. Chemiedidaktiker*in testen Sie die AR-Lernumgebung im Labor und geben anschließend ihre Dabei sollen Schwachstellen der AR-App aufgedeckt und konkrete Verbesserungsvorschläge entwickelt werden. Daher nehmen Sie an **zwei digitalen Befrag** **Testung im Labor**) teil.

Kontakt (Projektleitungen)

Professur für Fachdidaktik Life Sciences der Technischen Universität München
TUM School of Education (www.fdis.edu.tum.de):

Melanie Ripsam

Wissenschaftliche Mitarbeiterin
Postanschrift: Arcisstr. 21, 80333 München
Besucheranschrift: Marsstr. 20, 80335 München
Raum 231
Tel.: 089 289 25105
melanie.ripsam@tum.de

und

Prof. Dr. rer. nat. Claudia Nerdel

Professorin für Biologiedidaktik
Studiendekanin Naturwissenschaftliche Bildung (LA Gym)
Postanschrift: Arcisstr. 21, 80333 München
Besucheranschrift: Marsstr. 20, 80335 München
Raum 234
Tel: 089 289 25377
claudia.nerdel@tum.de

3 Einwilligungserklärung

Teilnehmerinformation und Einwilligungserklärung

Bitte bestätigen Sie, bevor Sie die Umfrage starten, dass Sie die Teilnehmerinformation gelesen, die Einwilligungserklärung unterschrieben und zurück an Me

Die Teilnehmerinformation und Einwilligungserklärung haben Sie gemeinsam mit dem Befragungs-Link in einer e-Mail erhalten. Sollten Sie die Dokumente no haben, stehen Ihnen folgende Links zur Verfügung: [Teilnehmerinformation](#) & [Einwilligungserklärung](#)

Haben Sie der Einwilligungserklärung zugestimmt?

Ich wurde schriftlich über die Studie und den Studienablauf aufgeklärt. Ich habe die Teilnehmerinformationen gelesen und verstanden. Ich bin mir bewusst, c Studie freiwillig ist und ich sie jederzeit und ohne Angabe von Gründen beenden kann. Mögliche Fragen konnten zu meiner Zufriedenheit beantwortet werde

Wenn Sie mehr Information über die Verarbeitung Ihrer personenbezogenen Daten wünschen, bitte lesen Sie die Teilnehmerinformation (s.o. Link). Sollten S haben, wenden Sie sich an die Projektleitung Melanie Ripsam (s.o. e-Mail).

- ja
 nein

4.1 EE abgelehnt

Die Umfrage ist beendet!

Sie haben die Einwilligungserklärung nicht gelesen oder dieser nicht zugestimmt.

Bei Fragen oder Schwierigkeiten wenden Sie sich bitte an die Projektleitung Melanie Ripsam
(e-Mail: melanie.ripsam@tum.de oder Tel.: 0176 83 21 67 22)

5.1 EE zugestimmt

1. Digitale Befragung

Bevor Sie mit der Testung der AR-Lernumgebung im Labor beginnen, füllen Sie bitte den Fragebogen auf den folgenden Seiten vollständig aus: Der Fragebogen wurde zur Pilotierung der AR-Lernumgebung und der Testinstrumente formuliert. Er wird ca. **40 Minuten** in Anspruch nehmen und besteht aus

- **Teil 1:** Zu Beginn erfolgt eine kurze Abfrage von demografischen und organisatorischen Daten.
- **Teil 2:** Hier werden Ihre Einstellungen und Selbstwirksamkeitserwartungen zu digitalen Medien und Innovationen wie Augmented Reality für bzw. Lehrveranstaltungen (LVen) erfasst.
- **Teil 3:** Es schließen zwei chemische Testaufgaben, die **per lautem Denken** bearbeitet werden sollen, die Befragung ab. Dabei soll Ihr Umgang Fachsprache und Ihr Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis erhoben werden.

Empfehlung: Vermeiden Sie Störungen, minimieren Sie Geräuschkulissen, achten Sie auf eine ruhige Arbeitsatmosphäre und nehmen Sie sich a Bearbeitung. Füllen Sie den Fragebogen (inkl. allen drei Teilen) an einem Stück ohne Unterbrechungen aus.

Anmerkung zur Methode des lauten Denkens: Für die Aufzeichnungen Ihrer Äußerungen verwenden Sie ein Mikrofon. Hierfür wird das kostenlose Softwarepro Sollten Sie Audacity noch nicht auf Ihrem Rechner installiert haben, würde ich Sie bitten dies vor Umfragebeginn zu erledigen und sich kurz mit den Funktionen machen. Informationen zur Installation und Anwendung erhalten Sie durch Klick auf folgenden Link: [Installations- und Gebrauchsanleitung für Audacity](#)

Hinweis: Der gesamte Fragebogen enthält **KEINE** zurück-Buttons.

5.2 Code

Die Befragung erfolgt anonym. Dennoch ist es wichtig, dass wir die Antworten von der ersten Befragung d (nach der Testung im Labor) zuordnen können. Es wird daher ein Code verwendet, der nur von Ihnen nach kann.

Hinweise:

Ä, Ü etc. werden nicht in AE, UE etc. geändert, sondern bleiben Ä, Ü etc.

Bitte verwenden Sie Großbuchstaben.

Bitte tragen Sie den letzten Buchstaben Ihres (ersten) Vornamens ein (z.B. Max Mustermann = X):

Bitte tragen Sie die letzte Ziffer Ihres Geburtsjahres ein (z.B. 12. Januar 1996 = 6 oder 7. Juli 2000 = 0):

Bitte tragen Sie den zweiten Buchstaben Ihres Geburtsortes ein (z.B. Magdeburg = A):

Bitte tragen Sie den Tag Ihres Geburtsdatums als zweistellige Zahl ein (z.B. 12. Januar 1997 = 12 oder 6. Juli 2003 = 06):

Bitte tragen Sie den ersten Buchstaben des (ersten) Vornamens Ihrer Mutter ein (z.B. Sarah Mustermann = S):

Bitte tragen Sie den letzten Buchstaben des (ersten) Vornamens Ihrer Mutter ein (z.B. Sarah Mustermann = H):

Bitte tragen Sie den Tag des Geburtsdatums Ihrer Mutter als zweistellige Zahl ein (z.B. 17. Juli 1965 = 17 oder 09. August 1959 = 09):

6 Teil 1

TEIL 1

Demografische und organisatorische Daten

7 9.1. Definitionen

Bitte definieren Sie, was Sie persönlich unter digitalen Medien verstehen.

Ihnen stehen max. 500 Zeichen zur Verfügung.

8 9.1. Definitionen 1

Bitte definieren Sie, was Sie persönlich unter **Augmented Reality** verstehen.

Ihnen stehen max. 500 Zeichen zur Verfügung.

9. 9.2. Demografische und organisatorische Daten: Geschlecht

Bitte geben Sie Ihr Geschlecht an.

- männlich
 weiblich
 divers
 keine Angabe

10. 9.2. Demografische und organisatorische Daten 1: Alter

Wie alt sind Sie?

Bitte nur eine Antwort auswählen.

- jünger als 25 Jahre
 25 – 30 Jahre
 31 – 40 Jahre
 41 – 50 Jahre
 51 – 60 Jahre
 älter als 60 Jahre

11. 9.2. Demografische und organisatorische Daten 2: Tätigkeit an Schule oder Universität

Sind Sie an einer Schule oder Universität als Lehrperson tätig?

Bitte nur eine Antwort auswählen.

(Sollten Sie an einer Schule und Universität tätig sein, so wählen Sie jene Einrichtung, in der Sie mit einer höheren Stundenanzahl pro Woche unterrichten bzw.

- Schule
 Universität
 Ich bin keine Lehrperson.

11.1.1. Keine Lehrperson

Welche Tätigkeit üben Sie aus?

Tippen Sie Ihren Beruf in das Textfeld ein.

11.2.1. Filter

An welcher Schulart unterrichten Sie?

Bitte nur eine Antwort auswählen.

- Gymnasium
 Realschule
 FOS
 BOS
 andere (bitte angeben):

11.2.2. Filter

Hat Ihre Schule ein besonderes Schulprofil (Bsp.: Inklusion, Digitalisierung usw.)?

Bitte eine Antwort auswählen. Sie können in dem Textfeld auch mehrere Aspekte aufzählen.

- nein
 ja (bitte angeben):

11.3.1. Filter

Nennen Sie die Fächer, die Sie hauptsächlich an Ihrer Schule unterrichten.

Wählen Sie nur diejenigen Fächer aus, in denen Sie mindestens drei Unterrichtsstunden pro Woche unterrichten.

- Biologie
- Chemie
- Physik
- Informatik
- Mathematik
- andere (Fremdsprache, Kunst, Sport, usw.)

11.3.2 Filter

Seit wie vielen Jahren unterrichten Sie schon an Schulen (das Referendariat eingerechnet)?

Bitte nur eine Antwort auswählen.

- weniger als 1 Jahr
- 1-3 Jahre
- 4-5 Jahre
- 6-9 Jahre
- 10-14 Jahre
- 15-19 Jahre
- 20 Jahre oder mehr

11.3.3 Filter

In welchen Klassenstufen unterrichten Sie derzeit das Fach Chemie (auch NUT)?

Bitte Zutreffendes ankreuzen. Eine Mehrfachauswahl ist möglich.

- Klassenstufe 5
- Klassenstufe 6
- Klassenstufe 7
- Klassenstufe 8
- Klassenstufe 9
- Klassenstufe 10
- Klassenstufe 11
- Klassenstufe 12

11.3.4 Filter

Wie viele Klassen unterrichten Sie aktuell im Fach Chemie?

Bitte fügen Sie eine Nummer ein.

11.4.1 Filter

Wie oft thematisieren Sie in Ihrem Chemieunterricht explizit die chemische Fachsprache über alle Klassen hinweg?

Bitte nur eine Antwort auswählen.

- nie
- 1-3 Mal pro Schuljahr
- 1-3 Mal pro Halbjahr
- 1-3 Mal pro Monat
- 1-3 Mal pro Woche
- 5-6 Mal pro Woche
- Jede Unterrichtsstunde

11.4.2 Filter

Wie oft thematisieren Sie in Ihrem Chemieunterricht explizit den Wechsel von Stoff- auf Teilchenebene über alle Klassen hinweg?

Bitte nur eine Antwort auswählen.

- nie
- 1-3 Mal pro Schuljahr
- 1-3 Mal pro Halbjahr
- 1-3 Mal pro Monat
- 1-3 Mal pro Woche
- 5-6 Mal pro Woche
- Jede Unterrichtsstunde

11.4.3 ... Filter

Wie oft thematisieren Sie in Ihrem Chemieunterricht explizit das chemische Modellieren über alle Klassen hinweg?

Bitte nur eine Antwort auswählen.

- nie
 1-3 Mal pro Schuljahr
 1-3 Mal pro Halbjahr
 1-3 Mal pro Monat
 1-3 Mal pro Woche
 5-6 Mal pro Woche
 Jede Unterrichtsstunde

11.5.1 ... Filter

Nutzen Sie digitale Medien in Ihrem Chemieunterricht?

Bitte wählen Sie eine Antwort aus.

- ja
 nein

11.6.1 ... Filter

Seit wie vielen Jahren setzen Sie digitale Medien in Ihrem Chemieunterricht ein?

Bitte eine Antwort auswählen.

- Ich habe noch keine digitalen Medien im Chemieunterricht eingesetzt
 weniger als 1 Jahr
 1-3 Jahre
 4-5 Jahre
 6-9 Jahre
 10-14 Jahre
 15-19 Jahre
 20 oder mehr Jahre
 möchte ich nicht angeben

11.6.2 ... Filter

Welche digitalen Werkzeuge haben Sie oder Ihre Schüler*innen im Chemieunterricht bereits eingesetzt?

Mehrere Antwortmöglichkeiten sind möglich.

- Präsentationen
 Digitale Poster und Pinnwände
 Videos/Audios anschauen
 Blogs
 Videos/Audios erstellen
 Ich habe noch keine digitalen Werkzeuge im Chemieunterricht eingesetzt
 Online-Lernumgebungen
 Online-Quize und Umfragen
 Interaktive Übungen und Apps
 Sonstiges (bitte angeben):
 Möchte ich nicht angeben

11.7.1 ... Filter

Haben Sie an Ihrer Schule bereits mit Augmented Reality gearbeitet?

Bitte eine Antwort auswählen.

- ja
 nein

11.8.1 ... Filter

Für welche chemischen Unterrichtsinhalte nutzen Sie digitale Medien? Nennen Sie auch das Medium selbst.

Bsp.: Schülerexperimente (Säure-Base-Reaktionen): Erstellung von Experimentiervideos mit dem iPad

11.8.2 ... Filter

Nutzen Sie digitale Medien in Ihrem Chemieunterricht für einen der genannten Schwerpunkte *Chemische Fachsprache, Stoff-Teilchen-Ebene Modellieren*?

Bitte wählen Sie für jeden Themenschwerpunkt eine Antwort aus.

	ja	nein
Chemische Fachsprache	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Stoff-Teilchen-Ebenenwechsel	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Chemisches Modellieren	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

11.8.2.1.1 Chemische Fachsprache

Für welche chemischen Inhalte im Zusammenhang mit der chemischen Fachsprache nutzen Sie digitale Medien? Nennen Sie die Medien sowie bestimmen Sie das chemische Themengebiet (bspw. iPads; eBooks; Neutralisationsreaktion).

Eine Mehrfachauswahl ist möglich.

- Digitale Medien
- Digitale Werkzeuge
- Themengebiete

11.8.2.2.1 S-T-EW

Für welche chemischen Inhalte im Zusammenhang mit dem Stoff-Teilchen-Ebenenwechsel nutzen Sie digitale Medien? Nennen Sie die Medien und bestimmen Sie das chemische Themengebiet (bspw. iPads; interaktive Arbeitsblätter, Aufbau des PSE).

Eine Mehrfachauswahl ist möglich.

- Digitale Medien
- Digitale Werkzeuge
- Themengebiete

11.8.2.3.1 Chemische Modellieren

Für welche chemischen Inhalte im Zusammenhang mit dem chemischen Modellieren nutzen Sie digitale Medien? Nennen Sie die Medien sowie bestimmen Sie das chemische Themengebiet (bspw. iPads; Videos; Kristallstrukturen).

Eine Mehrfachauswahl ist möglich.

- Digitale Medien
- Digitale Werkzeuge
- Themengebiete

11.9.1 Lehrveranstaltungen

Hat Ihre Arbeitsgruppe an der Universität ein besonderes Profil bzw. einen besonderen Interessenschwerpunkt (Bsp.: Inklusion, Digitalisierung)? Bitte eine Antwort auswählen. Sie können in dem Textfeld auch mehrere Aspekte aufzählen.

- nein
- ja (bitte angeben):

11.10.1 Lehrveranstaltungen

Nennen Sie die naturwissenschaftlichen Fachbereiche, die in Ihren Lehrveranstaltungen thematisiert werden.

Eine Mehrfachauswahl ist möglich.

- Biologie
- Chemie
- Physik
- Informatik
- Mathematik
- andere (Fremdsprache, Kunst, Sport, usw.)

11.10.2 Lehrveranstaltungen

Thematisieren Sie in Ihren Lehrveranstaltungen fachdidaktische Inhalte?

Bitte eine Antwort auswählen.

- ja
- nein

11.10.3 Lehrveranstaltungen

Seit wie vielen Jahren lehren Sie schon an Universitäten?

Bitte nur eine Antwort auswählen.

- weniger als 1 Jahr
- 1-3 Jahre

- 4-5 Jahre
- 6-9 Jahre
- 10-14 Jahre
- 15-19 Jahre
- 20 Jahre oder mehr

11.10.4 Lehrveranstaltungen

Welche Lehrveranstaltungen halten Sie derzeit? Geben Sie den/die Titel der Lehrveranstaltungen mit Fachbereich (Chemie, Physik, Mathema an.

Eine Mehrfachauswahl ist möglich. Sie können in einem Textfeld mehrere Veranstaltungen angeben.

- für das Bachelorstudium
- für das Masterstudium

11.10.5 Lehrveranstaltungen

In wie vielen Kursen lehren Sie aktuell chemische Inhalte?

Bitte fügen Sie eine Nummer ein.

11.11.1 Lehrveranstaltungen

Wie oft thematisieren Sie in Ihren Lehrveranstaltungen explizit die chemische Fachsprache über alle Kurssitzungen hinweg?

Bitte nur eine Antwort auswählen.

- nie
- 1-3 Mal in zwei Semestern
- 1-3 Mal pro Semester
- 1-3 Mal pro Monat
- 1-3 Mal pro Woche
- 5-6 Mal pro Woche
- Jede Kurssitzung

11.11.2 Lehrveranstaltungen

Wie oft thematisieren Sie in Ihren Lehrveranstaltungen explizit den Wechsel von Stoff- auf Teilchenebene über alle Kurssitzungen hinweg?

Bitte nur eine Antwort auswählen.

- nie
- 1-3 Mal in zwei Semestern
- 1-3 Mal pro Semester
- 1-3 Mal pro Monat
- 1-3 Mal pro Woche
- 5-6 Mal pro Woche
- Jede Kurssitzung

11.11.3 Lehrveranstaltungen

Wie oft thematisieren Sie in Ihren Lehrveranstaltungen explizit das chemische Modellieren über alle Kurssitzungen hinweg?

Bitte nur eine Antwort auswählen.

- nie
- 1-3 Mal in zwei Semestern
- 1-3 Mal pro Semester
- 1-3 Mal pro Monat
- 1-3 Mal pro Woche
- 5-6 Mal pro Woche
- Jede Kurssitzung

11.12.1 Filter

Nutzen Sie digitale Medien in Ihren Lehrveranstaltungen?

Bitte wählen Sie eine Antwort aus.

- ja
- nein

11.13.1 Filter

Seit wie vielen Jahren setzen Sie digitale Medien in Ihren Lehrveranstaltungen ein?

Bitte eine Antwort auswählen.

- Ich habe noch keine digitalen Medien in Lehrveranstaltungen eingesetzt
 weniger als 1 Jahr
 1-3 Jahre
 4-5 Jahre
 6-9 Jahre
 10-14 Jahre
 15-19 Jahre
 20 oder mehr Jahre
 möchte ich nicht angeben

11.13.2 Filter

Welche digitalen Werkzeuge haben Sie oder Ihre Student*innen in Lehrveranstaltungen bereits eingesetzt?

Mehrere Antwortmöglichkeiten sind möglich.

- Präsentationen
 Digitale Poster und Pinnwände
 Videos/Audios anschauen
 Blogs
 Videos/Audios erstellen
 Ich habe noch keine digitalen Werkzeuge in Lehrveranstaltungen eingesetzt
 Online-Lernumgebungen
 Online-Quize und Umfragen
 Interaktive Übungen und Apps
 Sonstiges (bitte angeben):
 Möchte ich nicht angeben

11.14.1 Filter

Haben Sie an Ihrer Universität bereits mit Augmented Reality gearbeitet?

Bitte eine Antwort auswählen.

- ja
 nein

11.15.1 Lehrveranstaltungen

Für welche Kursinhalte nutzen Sie digitale Medien in Ihren Lehrveranstaltungen? Nennen Sie auch das Medium selbst.

Bsp.: Erstellung von Erklärvideos (Säure-Base-Reaktionen) mit dem iPad

11.15.2 Lehrveranstaltungen

Nutzen Sie digitale Medien in Ihren Lehrveranstaltungen für einen der genannten Schwerpunkte *Chemische Fachsprache, Stoff-Teilchen-Ebene Modellieren*?

Bitte wählen Sie für jeden Themenschwerpunkt eine Antwort aus.

	ja	nein
Chemische Fachsprache	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Stoff-Teilchen-Ebenenwechsel	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Chemisches Modellieren	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

11.15.2.1.1 Chemische Fachsprache

Für welche chemischen Inhalte im Zusammenhang mit der chemischen Fachsprache nutzen Sie digitale Medien? Nennen Sie die Medien sowie bestimmen Sie das chemische Themengebiet (bspw. iPads; eBooks; Neutralisationsreaktion).

Eine Mehrfachauswahl ist möglich.

- Digitale Medien
 Digitale Werkzeuge
 Themengebiete

11.15.2.2.1 S-T-EW

Für welche chemischen Inhalte im Zusammenhang mit dem Stoff-Teilchen-Ebenenwechsel nutzen Sie digitale Medien? Nennen Sie die Medien und bestimmen Sie das chemische Themengebiet (bspw. iPads; interaktive Arbeitsblätter, Aufbau des PSE).

Eine Mehrfachauswahl ist möglich.

- Digitale Medien

Digitale Werkzeuge:

Themengebiete:

11.15.2.3.1 Chemische Modellieren

Für welche chemischen Inhalte im Zusammenhang mit dem chemischen Modellieren nutzen Sie digitale Medien? Nennen Sie die Medien sowie bestimmen Sie das chemische Themengebiet (bspw. iPads; Videos; Kristallstrukturen).

Eine Mehrfachauswahl ist möglich.

Digitale Medien:

Digitale Werkzeuge:

Themengebiete:

12 9.2. Demografische und organisatorische Daten 5: Studium

Welches Studium haben Sie absolviert?

Lehramt

Sonstiges (Bitte angeben):

12.1.1 Lehramtsstudium

Nennen Sie das Lehramt, das Sie studiert haben.

Bitte zutreffendes ankreuzen. Eine Mehrfachauswahl ist möglich.

Schulart (bitte angeben):

Fächerkombination (bitte angeben):

ggf. Erweiterungsfach 1 (bitte angeben):

ggf. Erweiterungsfach 2 (bitte angeben):

Sonstiges (bitte angeben):

12.1.2 Lehramtsstudium

Haben Sie ein Referendariat absolviert?

Bitte nur eine Antwort auswählen.

ja

nein

13 9.2. Demografische und organisatorische Daten 6: Digitalisierung und Studium

Haben Sie bereits im Studium das Thema Digitalisierung behandelt?

Bitte eine Antwort auswählen.

ja

nein

13.1.1 Digitalisierung im Studium

Nennen Sie die Themenbereiche, für welche digitale Medien in Ihrem Studium eingesetzt wurden.

13.2.1 Digitalisierung im Studium

Haben Sie bereits im Studium Augmented Reality behandelt?

Bitte eine Antwort auswählen.

ja

nein

13.2.1.1.1 AR im Studium

Nennen Sie die Themen, für welche AR in Ihrem Studium eingesetzt wurde.



14 9.2. Demografische und organisatorische Daten 7: Fortbildung

Haben Sie bereits Fortbildungen zum Thema Digitalisierung besucht?

Bitte eine Antwort auswählen.

- ja
 nein

14.1.1 Fortbildungen Digitale Medien

Nennen Sie die Anzahl und Themeninhalte der besuchten Fortbildungen zu digitalen Medien.

Anzahl (bitte angeben):

Art der Fortbildungen bzw. Themenschwerpunkt (bitte angeben):

14.1.2 Fortbildung Digitalisierung besucht

Haben Sie bereits Fortbildungen zum Thema Augmented Reality besucht?

Bitte eine Antwort auswählen.

- ja
 nein

14.2.1 Fortbildung AR Themen

Nennen Sie die Anzahl und die Themeninhalte bzw. Art der besuchten AR-Fortbildungen

Anzahl (bitte angeben):

Art der AR-Fortbildung bzw. Themeninhalte (bitte angeben):

15 9.2. Demografische und organisatorische Daten 7: Privat

Nutzen Sie privat digitale Medien?

Bitte eine Antwort auswählen.

- ja
 nein

15.1.1 Privat Digitale Medien

Nennen Sie die Anzahl der Verwendungen (bspw. regelmäßig, gelegentlich, ab und zu usw.) und die Themeninhalte, für die Sie digitale Medien (YouTube Videos, Social Media usw.)

Eine Mehrfachauswahl ist möglich (Sie können bis zu vier Themenbereiche nennen).

Anzahl der Verwendungen (bitte angeben):

Private Verwendung von Digitalen Medien für (bitte angeben):

Private Verwendung von Digitalen Medien für (bitte angeben):

Private Verwendung von Digitalen Medien für (bitte angeben):

Private Verwendung von Digitalen Medien für (bitte angeben):

16 9.2. Demografische und organisatorische Daten 7: Privat

Nutzen Sie privat Augmented Reality?

Bitte eine Antwort auswählen.

- ja
 nein

16.1.1 AR Privat Art und Themen

Nennen Sie die Anzahl Ihrer Verwendungen (bspw. regelmäßig, gelegentlich, ab und zu usw.) und die Themeninhalte (bspw. Online Shopping Sie AR privat nutzen.

Eine Mehrfachauswahl ist möglich (Sie können bis zu vier Themenbereiche nennen).

Anzahl der Verwendungen (bitte angeben):

Private Verwendung von AR für (bitte angeben):

Private Verwendung von AR für (bitte angeben):

Private Verwendung von AR für (bitte angeben):

Private Verwendung von AR für (bitte angeben):

17 zu Teil 2

Sie haben den ersten Teil des Fragebogens erfolgreich ausgefüllt.

18 Teil 2

TEIL 2

Einstellungen und Selbstwirksamkeitserwartungen
zu digitalen Medien und Augmented Reality

19 Einstellungen und Selbstwirksamkeit

Einstellungen und Selbstwirksamkeitserwartungen zu digitalen Medien und Augmented Reality

- Nun erfolgt die Befragung zu Ihren Einstellungen und Selbstwirksamkeitserwartungen hinsichtlich digitaler Medien und Augmented Reality im Chemieunterricht (CU) bzw. in Lehrveranstaltungen (LVen).
- Einstellungen zielen auf Ihre individuellen Bewertung(en) und Selbstwirksamkeitserwartungen auf Ihre subjektiv wahrgenommenen und voraussichtlichen Einsatzes digitaler Medien und Innovationen wie Augmented Reality im Chemieunterricht (CU) bzw. in Lehrveranstaltungen (LVen) ab.
- Es ist Ihre Expertise als Chemiedidaktiker bzw. (Chemie-) Wissenschaftler gefragt. Dementsprechend sind in den Items Anwendungen digitaler Medien im Chemieunterricht (CU) bzw. in Lehrveranstaltungen (LVen) gemeint.
- Entscheiden Sie möglichst spontan, sodass Ihre unmittelbare Einschätzung zum Tragen kommt. Bitte kreuzen Sie immer eine Antwort an, auch wenn Sie bei dem Begriffspaar unsicher sind.

20 Einstellungen

EINSTELLUNGEN

21 Einstellungen zu digitalen Medien

Einstellungen zu digitalen Medien

Welche der angeführten Aussagen zu digitalen Medien im Chemieunterricht (CU) bzw. in Lehrveranstaltungen (LVen) treffen hinsichtlich Ihrer persönlichen Einstellung?

Bitte wählen Sie stets eine Antwort aus.

	trifft gar nicht zu	trifft weniger zu	trifft weitgehend zu	trifft vollkommen zu
Digitale Medien sollten generell in den Fachlehrplänen der Schulen bzw. Universitäten ein starkes Gewicht erhalten.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Der Einsatz digitaler Medien ermöglicht in hohem Maße selbstbestimmtes Lernen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Durch den Einsatz digitaler Medien können Schüler*innen bzw. Student*innen besser zum Lernen im Fach Chemie motiviert werden.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Digitale Medien eröffnen Spielräume für Kreativität beim Lernen chemischer Inhalte.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Der Einsatz von digitalen Medien in der Schule bzw. Universität sorgt dafür, dass Lernende gut auf das Berufsleben vorbereitet werden.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Das Lernen mit digitalen Medien ist eine effiziente Form des Lernens im Fach Chemie.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Mit digitalen Medien kann ich CU bzw. LVen adressatengerechter planen und anpassen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Digitale Medien erlauben eine höhere Schüleraktivierung.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Für mich sind digitale Medien ein nützliches Arbeitsmittel zur Förderung des Stoff-Teilchen-Konzeptverständnisses im/n CU/LVen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Für mich sind digitale Medien ein nützliches Arbeitsmittel zur Förderung der chemischen Fachsprache im/n CU/LVen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Für mich sind digitale Medien ein nützliches Arbeitsmittel zur Darstellung verschiedener Repräsentationsformen auf Stoff- und Teilchenebene.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Für mich sind digitale Medien ein nützliches Arbeitsmittel um vorwissenschaftliche Vorstellungen von Schüler*innen bzw. Student*innen im/n CU/LVen zu thematisieren und Fehlvorstellungen gegebenenfalls zu beseitigen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Für mich sind digitale Medien ein nützliches Arbeitsmittel um das Modellverständnis im/n CU/LVen zu fördern.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Der Einsatz neuer Technologien im/n CU/LVen kann das kollaborative Arbeiten der Schüler*innen bzw. Student*innen fördern.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Der Einsatz digitaler Medien im/n CU/LVen kann das kooperative Arbeiten der Schüler*innen bzw. Student*innen fördern.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Der Einsatz digitaler Medien im/n CU/LVen kann das selbstregulierte Lernen der Schüler*innen bzw. Student*innen fördern.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Der Einsatz digitaler Medien kann die Fähigkeiten beim Experimentieren im/n CU/LVen fördern.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich würde es begrüßen, wenn digitale Medien häufiger für Lehr- und Lernzwecke genutzt würden.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Es ist wichtig für mich, mich mit meinen Schüler*innen bzw. Student*innen und/oder Kolleg*innen mithilfe digitaler Medien austauschen zu können.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Es gibt viele Unterrichtsvorbereitungen, die ich mit digitalen Medien leichter und schneller verrichten kann als ohne.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich nutze digitale Medien vor allem deswegen in meinem/n CU/LVen, weil ich dies tun muss.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich finde die Auseinandersetzung mit digitalen Medien spannend.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich würde gerne mehr über die unterschiedlichen Einsatzmöglichkeiten von digitalen Medien im/n CU/LVen wissen, als ich jetzt weiß.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich kann mir das Arbeiten ohne digitale Medien kaum noch vorstellen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

22 Einstellungen zu AR

Einstellungen zu Innovationen wie Augmented Reality

Welche der angeführten Aussagen zu technischen Innovationen wie Augmented Reality (AR) im Chemieunterricht (CU) bzw. in Lehrveranstaltungen (LVen) treffen in Ihrer persönlichen Einschätzung am ehesten zu?

Bitte wählen Sie stets eine Antwort aus.

	trifft gar nicht zu	trifft weniger zu	trifft weitgehend zu	trifft vollkommen zu
Innovationen wie Augmented Reality sollten generell in den Fachlehrplänen der Schulen bzw. Universitäten ein starkes Gewicht erhalten.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Der Einsatz von Innovationen wie Augmented Reality ermöglicht (voraussichtlich) in hohem Maße selbstbestimmtes Lernen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Durch den Einsatz von Innovationen wie Augmented Reality können Schüler*innen bzw. Student*innen (voraussichtlich) besser zum Lernen im Fach Chemie motiviert werden.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Innovationen wie Augmented Reality eröffnen (voraussichtlich) Spielräume für Kreativität beim Lernen chemischer Inhalte.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Der Einsatz von Innovationen wie Augmented Reality in der Schule bzw. Universität sorgt dafür, dass Lernende gut auf das Berufsleben vorbereitet werden.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Das Lernen mit Innovationen wie Augmented Reality ist (voraussichtlich) eine effiziente Form des Lernens im Fach Chemie.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Mit Innovationen wie Augmented Reality kann ich CU bzw. LVen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

adressatengerechter planen und anpassen.				
Innovationen wie Augmented Reality erlauben (voraussichtlich) eine höhere Schüleraktivierung.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Für mich sind Innovationen wie Augmented Reality ein nützliches Arbeitsmittel zur Förderung des Stoff-Teilchen-Konzeptverständnisses von Schüler*innen bzw. Student*innen im/n CU/LVen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Für mich sind Innovationen wie Augmented Reality ein nützliches Arbeitsmittel zur Förderung der chemischen Fachsprache im/n CU/LVen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Für mich sind Innovationen wie Augmented Reality ein nützliches Arbeitsmittel zur Darstellung verschiedener Repräsentationsformen auf Stoff- und Teilchenebene.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Für mich sind Innovationen wie Augmented Reality ein nützliches Arbeitsmittel, um vorwissenschaftliche Vorstellungen von Schüler*innen bzw. Student*innen im/n CU/LVen zu thematisieren und Fehlvorstellungen gegebenenfalls zu beseitigen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Für mich sind Innovationen wie Augmented Reality ein nützliches Arbeitsmittel, um das Modellverständnis im/n CU/LVen zu fördern.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Der Einsatz von Innovationen wie Augmented Reality im/n CU/LVen kann das kollaborative Arbeiten der Schüler*innen bzw. Student*innen fördern.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Der Einsatz von Innovationen wie Augmented Reality im/n CU/LVen kann das kooperative Arbeiten der Schüler*innen bzw. Student*innen fördern.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Der Einsatz von Innovationen wie Augmented Reality im/n CU/LVen kann das selbstregulierte Lernen der Schüler*innen bzw. Student*innen fördern.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Der Einsatz von Innovationen wie Augmented Reality kann die Fähigkeiten beim Experimentieren im/n CU/LVen fördern.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich würde es begrüßen, wenn Innovationen wie Augmented Reality häufiger für Lehr- und Lernzwecke genutzt würden.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Um Innovationen wie Augmented Reality als Lehr- und Lernmittel im/n CU/LVen zu verwenden, sind sie mir zu unsicher.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich finde die Auseinandersetzung mit Innovationen wie Augmented Reality spannend.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich würde gerne mehr über die unterschiedlichen Einsatzmöglichkeiten von Innovationen wie Augmented Reality im/n CU/LVen wissen, als ich jetzt weiß.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich probiere gerne neue innovative, technische Anwendungen aus.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

23 Selbstwirksamkeit

SELBSTWIRKSAMKEIT

24 Selbstwirksamkeit zu digitalen Medien

Selbstwirksamkeitserwartungen zu digitalen Medien

Welche der angeführten Aussagen zu digitalen Medien im Chemieunterricht (CU) bzw. in Lehrveranstaltungen (LVen) trifft hinsichtlich Ihrer persönlichen Einsat

Bitte wählen Sie stets eine Antwort aus.

	trifft gar nicht zu	trifft weniger zu	trifft weitgehend zu	trifft vollkommen zu
Ich komme gut damit zurecht neue digitale Materialien wie Lernvideos oder Animationen für meine(n) CU/LVen zu erstellen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Ich finde es leicht, Schüler*innen bzw. Student*innen zu erklären, wie digitale Medien zu bedienen sind.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich selbst kann digitale Medien sinnvoll im/n CU/LVen einsetzen, um Feedback von den Schüler*innen bzw. Student*innen zu erhalten.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Im/n CU/LVen ein Phänomen oder einen Prozess mithilfe digitaler Medien zu modellieren fällt mir leicht.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich bin grundsätzlich in der Lage digitale Medien zielgerichtet im/n CU/LVen einzusetzen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich selbst kann digitale Medien sinnvoll im/n CU/LVen einsetzen, um das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis von Schüler*innen bzw. Student*innen zu fördern.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich weiß worauf ich achten muss, wenn ich mithilfe digitaler Medien die fachsprachliche Kompetenz der Schüler*innen bzw. Student*innen im/n CU/LVen fördern möchte.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich weiß worauf ich achten muss, wenn ich digitale Medien einsetze, um nicht sichtbare chemische Prozesse auf Teilchenebene mithilfe von Repräsentationsformen zu visualisieren.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Es fällt mir leicht, digitale Medien zum Zwecke der Motivationssteigerung im/n CU/LVen einzusetzen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich kann digitale Medien zur Förderung des selbstregulierten Lernens im/n CU/LVen einsetzen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich kann digitale Medien zur Förderung des kooperativen Arbeitens im/n CU/LVen einsetzen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich kann digitale Medien zur Förderung des kollaborativen Arbeitens im/n CU/LVen einsetzen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich weiß wie ich vorgehen muss, um mithilfe digitaler Medien vorwissenschaftliche Vorstellungen von Schüler*innen bzw. Student*innen im/n CU/LVen zu thematisieren und Fehlvorstellungen gegebenenfalls zu beseitigen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich selbst kann digitale Medien zur Förderung der Modellkompetenz der Schüler*innen bzw. Student*innen einsetzen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Bei auftretenden technischen Schwierigkeiten benötige ich meist keine Hilfe von anderen Leuten.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Im technischen Umgang mit digitalen Medien und ihren verschiedenen Softwareprogrammen fühle ich mich sicher.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

25 Selbstwirksamkeit zu AR

Selbstwirksamkeitserwartungen zu Innovationen wie Augmented Reality

Welche der angeführten Aussagen zu technischen Innovationen wie Augmented Reality (AR) im Chemieunterricht (CU) bzw. in Lehrveranstaltungen (LVen) triffst du am ehesten auf Sie zu?

Bitte wählen Sie stets eine Antwort aus.

	trifft gar nicht zu	trifft weniger zu	trifft weitgehend zu	trifft vollkommen zu
Die technische Verwendung unbekannter innovativer Softwareprogramme kann ich schnell erlernen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich komme gut damit zurecht Lernumgebungen mit Innovationen wie Augmented Reality für meine(n) CU/LVen zu erstellen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich finde es leicht, Schüler*innen bzw. Student*innen zu erklären, wie Innovationen wie Augmented Reality zu bedienen sind.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich selbst kann Innovationen wie Augmented Reality sinnvoll im/n CU/LVen einsetzen, um Feedback von den Schüler*innen bzw. Student*innen zu erhalten.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Im/n CU/LVen ein Phänomen oder einen Prozess mithilfe Innovationen wie	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Augmented Reality zu modellieren fällt mir leicht.				
Ich bin grundsätzlich in der Lage Innovationen wie Augmented Reality zielgerichtet im/n CU/LVen einzusetzen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich selbst kann Innovationen wie Augmented Reality sinnvoll im/n CU/LVen einsetzen, um das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis bei Schüler*innen bzw. Student*innen zu fördern.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich weiß worauf ich achten muss, wenn ich mithilfe von Innovationen wie Augmented Reality die fachsprachliche Kompetenz der Schüler*innen bzw. Student*innen im/n CU/LVen fördern möchte.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich weiß worauf ich achten muss, wenn ich Innovationen wie Augmented Reality einsetze, um nicht sichtbare chemische Prozesse auf Teilchenebene mithilfe von Repräsentationsformen zu visualisieren.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Es fällt mir leicht, Innovationen wie Augmented Reality zum Zwecke der Motivationssteigerung im/n CU/LVen einzusetzen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich kann Innovationen wie Augmented Reality zur Förderung des selbstregulierten Lernens im/n CU/LVen einsetzen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich kann Innovationen wie Augmented Reality zur Förderung des kooperativen Arbeitens im/n CU/LVen einsetzen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich kann Innovationen wie Augmented Reality zur Förderung des kollaborativen Arbeitens im/n CU/LVen einsetzen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich weiß, wie ich vorgehen muss, um mithilfe von Innovationen wie Augmented Reality vorwissenschaftliche Vorstellungen von Schüler*innen bzw. Student*innen im/n CU/LVen zu thematisieren und Fehlvorstellungen gegebenenfalls zu beseitigen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich selbst kann Innovationen wie Augmented Reality zur Förderung der Modellkompetenz der Schüler*innen bzw. Student*innen einsetzen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

26 zu Teil 3

Sie haben den zweiten Teil des Fragebogens erfolgreich ausgefüllt.

27 Teil 3**TEIL 3****Testaufgaben aus der Chemie - Lautes Denken****28 Testaufgabe Einführung****Zwei Testaufgaben aus der Chemie- Elaboration per lautem Denken**

- Im Folgenden bearbeiten Sie zwei Aufgaben aus der Chemie mit der Methode des lauten Denkens.
- Dabei steht **insbesondere** Ihr Elaborationsprozess im Vordergrund. **Äußern** Sie daher **alle Gedankengänge laut** und erklären Sie mithilfe Donator-Akzeptor-Prinzip (**ohne zusätzlicher Materialien**) Ihr Vorgehen bei der Bearbeitung der beiden Testaufgaben.
- Bitte verwenden Sie hierfür **zusätzlich zu den Textfeldern** für schriftliche Erläuterungen **das Mikrophon** (Bsp.: mit dem Softwareprogramm Windows Voice Recorder). Auf diese Art und Weise können Ihre Aussagen aufgezeichnet werden.
- Im nächsten Schritt können Sie die Tonaufnahme als Audio-Datei im mp3-Format hochladen (s. Installations- und Gebrauchsanleitung für.

29 Aufwärmübung: Think Aloud

Sollten Sie mit der Methode des lauten Denken bisweilen noch nicht vertraut sein, können Sie vor der Bearb Testaufgaben eine Aufwärmübung zum lauten Denken durchführen.

Möchten Sie sich aufwärmen und das laute Denken trainieren?

- ja, ich möchte an einer Aufwärmübung teilnehmen.
- nein, ich fühle mich sicher mit der Methode des lauten Denkens und möchte mit der Bearbeitung beginnen.

29.1.1 Aufwärmübung**Aufwärmübung zum lauten Denken**

Es werden Ihnen zwei Übungsaufgaben vorgelegt. Bearbeiten Sie diese. Das Mikrofon muss in der Aufwärmphase nicht aktiviert werden. Auch ist keine Ergebniseingabe erforderlich. Diese Phase soll Ihnen lediglich Sicherheit im Umgang mit dem lauten Denken geben.

**Sprechen Sie stets laut aus, welche Gedankengänge Sie bei der Testbearbeitung durchlaufen. Die Methode des lauten Denkens zielt auf Erkenntnisse usw. ab.
Äußern Sie auch bei Unwissenheit oder Unsicherheit laut Ihre Gedanken.**

29.1.2 Aufwärmübung**Addition und Subtraktion**

Berechnen Sie folgende Aufgabe, indem Sie laut Ihre Gedankengänge äußern:

$$123 - 358 + 54 =$$

29.1.3 Aufwärmübung**Schätzaufgabe**

Schätzen Sie, wie viele Bücher sich in dem Bücherregal befinden. Äußern Sie laut Ihr Vorgehen.

**29.1.4 Aufwärmübung selbst**

Wenn Sie sich sicher mit der Methode des lauten Denkens fühlen, klicken Sie auf den Weiter-Button.

**Bei Unsicherheiten wird ein weiteres
Aufwärmtraining empfohlen:**

Betrachten Sie ein Regal in dem Raum, indem Sie sich befinden und schätzen Sie die darin befindlichen Gegenstände oder berechnen Sie $5 + 23$.
Sie den Vorgang eines beliebigen Themas.

Denken Sie stets daran alle Gedankengänge laut zu äußern.

30 Sicher im Lauten Denken

Sie fühlen sich sicher mit der Methode des lauten Denkens, so gelangen Sie auf der nächsten Seite zur ersten Testaufgabe.

Bitte drücken Sie bevor sie mit der Aufgabenbearbeitung starten und den Weiter-Button klicken auf den **Aufnahmeknopf Ihres Mikrofons**.

Sobald Sie die erste Aufgabe abgeschlossen haben, beenden Sie die Tonaufnahme und laden die Audio-Datei hoch. Für Testaufgabe 2 wiederhol

31 Testaufgaben per lautem Denken

Testaufgabe 1

Das Textfeld steht Ihnen für schriftliche Erläuterungen zur Verfügung.

Bitte denken Sie daran den Aufnahmeknopf Ihres Mikrofons aktiviert zu haben.

Upload

Bitte laden Sie hier Ihre Tonaufnahme als .mp3-Dateiformat (max. 8 MB) hoch.

Hinweis: Sollte Ihre Audio Datei größer als 8 MB sein, so teilen Sie die Gesamtdatei in zwei bis drei kleinere Tonaufnahmen (jeweils max. 8 MB) in zusätzlichen Upload-Fenstern hoch. Achten Sie darauf, dass Ihre Dateien chronologisch nummeriert sind. Bitte befolgen Sie hierfür die Anleitung [Schneiden und Speichern von großen Audio Dateien](#): Bitten klicken Sie auf den Link

Dateiname	<input type="text"/>
Dateigröße	<input type="text"/>
Dateiname	<input type="text"/>
Dateigröße	<input type="text"/>
Dateiname	<input type="text"/>
Dateigröße	<input type="text"/>

32 Testaufgaben per lautem Denken

Auf der nächsten Seite befindet sich die zweite und damit letzte Aufgabe des Fragebogens.
Sobald Sie mit der Bearbeitung beginnen möchten, drücken Sie **erneut** auf den **Aufnahmeknopf Ihres Mikrofons**.

33 Testaufgaben per lautem Denken
Testaufgabe 2

Bitte denken Sie daran den Aufnahmeknopf Ihres Mikrofons aktiviert zu haben.

Die Textfelder stehen Ihnen für schriftliche Erläuterungen zur Verfügung.

- a)
- b)
- c)
- d)
- e)
- f)

Dieses Textfeld bietet Ihnen die Gelegenheit (je nach Bedarf) zusätzliche Erläuterungen anzuführen.

Upload

Bitte laden Sie hier Ihre Tonaufnahme als .mp3-Dateiformat (max. 8 MB) hoch.

Hinweis: Sollte Ihre Audio Datei größer als 8 MB sein, so teilen Sie die Gesamtdatei in zwei bis drei kleinere Tonaufnahmen (jeweils max. 8 MB) zusätzlichen Upload-Fenstern hoch. Achten Sie darauf, dass Ihre Dateien chronologisch nummeriert sind. Bitte befolgen Sie hierfür die Anleitung Schneiden und Speichern von großen Audio Dateien: [Bitte klicken Sie auf den Link](#)

Dateiname

Dateigröße

Dateiname

Dateigröße	<input type="text"/>
Dateiname	<input type="text"/>
Dateigröße	<input type="text"/>

34. Endseite

**Vielen Dank, dass Sie sich die Zeit genommen haben an der
Befragung teilzunehmen.**

**Bitte vereinbaren Sie nun mit der Projektleitung Malenia Binsam (eMail: malenia.binsam@tum.de oder
Tel: 0174 93 21 67 22) einen Termin für die Testung der AB-Fernumgebung im Labor.
Auch für Rückfragen steht Ihnen die Projektleitung jederzeit zur Verfügung.**

A 1.1.2 Posttest

Fragebogen

1 Herzlich Willkommen

Herzlich Willkommen zur Pilotierung einer AR-Lernumgebung zum Thema Elektrolyse von Zinkiodid

2 Einführung

Liebe*r Untersuchungsteilnehmer*in,

ich freue mich, dass Sie an der AR-Studie im Rahmen meines Promotionsprojekts teilnehmen. Die Studie wird von der Professur für Fachdidaktik Life Science unter der Leitung von mir, Melanie Ripsam, und Prof. Dr. Claudia Nerdel durchgeführt. Im Folgenden möchte ich Sie über die Ziele und den Ablauf der Studie informieren.

Studienziel

Das Ziel der Erhebung ist es, die **Tauglichkeit einer AR-Lernumgebung für den lernwirksamen Einsatz im Chemieunterricht bzw. in universitären Kontexten** zu bewerten, Ihre **Einstellungen sowie Selbstwirksamkeitserwartungen zu digitalen Medien und Augmented Reality** zu erheben sowie Ihren **Umgang mit AR** in der **Fachsprache hinsichtlich der Stoff- und Teilchenebenen** zu erfassen.

Ablauf

Als (angehende) Chemielehrkraft, Naturwissenschaftler*in bzw. Chemiedidaktiker*in testen Sie die AR-Lernumgebung im Labor und geben anschließend Ihre Einschätzung zu den Schwachstellen der AR-App aufgedeckt und konkrete Verbesserungsvorschläge entwickelt werden. Daher nehmen Sie an **zwei digitalen Befragungen (zwei Testungen im Labor)** teil.

Hinweis

Sie wurden vor der Studienteilnahme und damit vor der 1. digitalen Befragung schriftlich über die Studie und den Studienablauf aufgeklärt. Ihre Antworten werden selbstverständlich anonym erhoben und ausschließlich zu wissenschaftlichen Zwecken ausgewertet. In diesem Zusammenhang haben Sie die Teilnehmerinformation gelesen und diese sowie der Einwilligungserklärung schriftlich zugestimmt. Während des gesamten Erhebungszeitraums ist die Teilnahme an der Studie freiwillig und die Angabe von Gründen beenden werden.

Wenn Sie mehr Information über die Verarbeitung Ihrer personenbezogenen Daten wünschen, lesen Sie bitte die Teilnehmerinformation (s.u. Links). Sollten Sie Fragen haben, wenden Sie sich an die Projektleitung Melanie Ripsam (s.u. e-Mail).

Links

- Teilnehmerinformation
- Einwilligungserklärung

Kontakt (Projektleitungen)

Professur für Fachdidaktik Life Sciences der Technischen Universität München
TUM School of Education (www.fdl.s.edu.tum.de):

Melanie Ripsam

Wissenschaftliche Mitarbeiterin
Postanschrift: Arcisstr. 21, 80333 München
Besucheranschrift: Marsstr. 20, 80335 München
Raum 231
Tel.: 089 289 25105
melanie.ripsam@tum.de

und

Prof. Dr. rer. nat. Claudia Nerdel

Professorin für Biologiedidaktik
Studiendekanin Naturwissenschaftliche Bildung (LA Gym)
Postanschrift: Arcisstr. 21, 80333 München
Besucheranschrift: Marsstr. 20, 80335 München
Raum 234
Tel: 089 289 25377
claudia.nerdel@tum.de

3 Schritte 1 und 2 erledigt

Studienteilnahmeverlauf

Bitte bestätigen Sie, bevor Sie die Umfrage starten, dass Sie an der 1. digitalen Befragung und der Testung der AR-Lernumgebung im Labor teilgenommen haben.

Haben Sie den digitalen Pretest ausgefüllt, die AR-Lernumgebung im Labor getestet und möchten nun an der 2. digitalen Befragung (Posttest) teilnehmen?

- ja, ich habe den Pretest ausgefüllt, die AR-App im Labor getestet und möchte nun mit dem Posttest beginnen.
- nein, ich habe nicht an allen Schritten teilgenommen oder/und möchte die Pilotierung beenden.

4.1 Schritte 1 und 2 NICHT erledigt

Die Umfrage ist beendet!

Sie haben entweder an der 1. digitalen Befragung bzw. der Testung im Labor nicht teilgenommen oder möchten die Teilnahme aus anderen Gründen beenden (s. Einwilligungserklärung).

Bei Fragen oder Schwierigkeiten wenden Sie sich bitte an die Projektleitung Melanie Ripsam
(e-Mail: melanie.ripsam@tum.de oder Tel.: 0176 83 21 67 22)

5.1 Schritt 1 und 2 erledigt

2. Digitale Befragung

Nachdem Sie die Testung der AR-Lernumgebung im Labor abgeschlossen haben, füllen Sie bitte den Fragebogen auf den folgenden Seiten voll beachten:

Der Fragebogen wurde zur Pilotierung der AR-Lernumgebung und der Testinstrumente formuliert. Die Gesamtheit aller Items und offenen Fragen ist auf eine **Minuten** ausgelegt. Ferner besteht der Fragebogen aus drei Teilen:

- **Teil 1:** Zu Beginn erfolgt ein Akzeptanz- und Usabilitytest hinsichtlich der Tauglichkeit der AR-Lernumgebung für den Chemieunterricht (CU (LVen)).
- **Teil 2:** Hier werden Ihnen, in Ergänzung zu Teil 1, offene Fragen gestellt, mit welchen Sie die AR-Lernumgebung selbstständig bewerten und können.
- **Teil 3:** Es schließen, in Anlehnung zur 1. digitalen Befragung, chemische Testaufgaben, die **per lautem Denken** bearbeitet werden sollen, die Umgang mit der chemischen Fachsprache und Ihr Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis erhoben werden.

Empfehlung: Vermeiden Sie Störungen, minimieren Sie Geräuschkulissen, achten Sie auf eine ruhige Arbeitsatmosphäre und nehmen Sie sich a Bearbeitung. **Füllen Sie den Fragebogen (inkl. allen drei Teilen) an einem Stück ohne Unterbrechungen aus.**

Anmerkung zur Methode des lauten Denkens: Für die Aufzeichnungen Ihrer Äußerungen verwenden Sie ein Mikrofon. Hierfür wird das kostenlose Softwarepra Sollten Sie Audacity noch nicht auf Ihrem Rechner installiert haben, würde ich Sie bitten dies vor Umfragebeginn zu erledigen und sich kurz mit den Funktionen machen. Informationen zur Installation und Anwendung erhalten Sie durch Klick auf folgenden Link: [Installations- und Gebrauchsanleitung für Audacity](#)

Hinweis: Der gesamte Fragebogen enthält **KEINE** zurück-Buttons.

5.2 Code

Die Befragung erfolgt anonym. Dennoch ist es wichtig, dass wir die Antworten von der ersten Befragung d (nach der Testung im Labor) zuordnen können. Es wird daher ein Code verwendet, der nur von Ihnen nachv kann. Diesen Code haben Sie bereits im Pretest verwendet. Bitte geben Sie den Code erneut ein.

Hinweise:

Ä, Ü etc. werden nicht in AE, UE etc. geändert, sondern bleiben Ä, Ü etc.

Bitte verwenden Sie Großbuchstaben.

Bitte tragen Sie den letzten Buchstaben Ihres (ersten) Vornamens ein (z.B. Max Mustermann = X):

Bitte tragen Sie die letzte Ziffer Ihres Geburtsjahres ein (z.B. 12. Januar 1996 = 6 oder 7. Juli 2000 = 0):

Bitte tragen Sie den zweiten Buchstaben Ihres Geburtsortes ein (z.B. Magdeburg = A):

Bitte tragen Sie den Tag Ihres Geburtsdatums als zweistellige Zahl ein (z.B. 12. Januar 1997 = 12 oder 6. Juli 2003 = 06):

Bitte tragen Sie den ersten Buchstaben des (ersten) Vornamens Ihrer Mutter ein (z.B. Sarah Mustermann = S):

Bitte tragen Sie den letzten Buchstaben des (ersten) Vornamens Ihrer Mutter ein (z.B. Sarah Mustermann = H):

Bitte tragen Sie den Tag des Geburtsdatums Ihrer Mutter als zweistellige Zahl ein (z.B. 17. Juli 1965 = 17 oder 09. August 1959 = 09):

6 Teil 1

TEIL 1

Akzeptanz- und Usabilitytest: Bewertung der AR-Lernumgebung *Elektrolyse von Zinkiodid*

7 Akzeptanz

Akzeptanz- und Usabilitytest: Bewertung der AR-Lernumgebung *Elektrolyse von Zinkiodid*

- Nun erfolgt die Beurteilung der Tauglichkeit der AR-Lernumgebung für den lernwirksamen Einsatz im Chemieunterricht (CU) bzw. in universitären Lehrv sollen Schwachstellen der AR-Lernumgebung aufgedeckt und konkrete Verbesserungsvorschläge entwickelt werden.
- Um dies zu bewerkstelligen, ist Ihre Expertise als Chemiedidaktiker*in bzw. Chemiewissenschaftler*in gefragt. Nachdem Sie die AR-Lernumgebung erpr persönliches Urteil aus fach- und mediendidaktischer Perspektive ab. Das Augenmerk liegt, neben dem chemischen Inhalt der Redoxreaktionen, auf der Konzeptverständnis und dem Umgang mit den chemischen Repräsentationsformen (Texte, Bilder und Symbole). Grundlage Ihrer Bewertung sind Ihre in AR-Lernumgebung.

- Hierfür erhalten Sie mehrere Fragen aus unterschiedlichen Norm-Kriterien. Zwischen den Gegensatzpaaren „Trifft gar nicht zu“ und „Trifft vollkommen zu“ Likertskala soll eine Antwort gewählt werden (1=trifft gar nicht zu, 2=trifft weniger zu, 3=trifft weitgehend zu, 4=trifft vollkommen zu). Durch Markierung Ihre Zustimmung zu einem der Gegensatzpaare und ihren Abstufungen äußern. Entscheiden Sie möglichst spontan, sodass Ihre unmittelbare Einschätzung Bitte klicken Sie immer eine Antwort an, auch wenn Sie bei der Einschätzung zu einem Begriffspaar unsicher sind.

8 Akzeptanz

Akzeptanz

9 1. Akzeptanz

Akzeptanz

Welche der angeführten Aussagen zu der AR-Lernumgebung *Elektrolyse von Zinkiodid* treffen hinsichtlich Ihrer persönlichen Einschätzung für den Einsatz im C Lehrveranstaltungen (LVen) am ehesten zu?

Bitte wählen Sie stets eine Antwort aus. Lassen Sie keine der Fragen aus.

	trifft gar nicht zu	trifft weniger zu	trifft weitgehend zu	trifft vollkommen zu
Die Bearbeitung der AR-Lernumgebung hat mir gut gefallen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich würde die AR-Lernumgebung in meinem/n eigenen CU/LVen einsetzen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die AR-Lernumgebung fand ich für das Verständnis von Redoxreaktionen bzw. der Elektrolyse von Zinkiodid auf Stoff- und Teilchenebene hilfreich.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die AR-Lernumgebung fand ich für den Umgang mit den unterschiedlichen chemischen Repräsentationsformen hilfreich.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Durch die Darstellung der verschiedenen Repräsentationsformen fand ich die AR-Lernumgebung für das Verständnis von Redoxreaktionen auf Stoff- und Teilchenebenen hilfreich.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die AR-Lernumgebung sollte hilfreich für die Auseinandersetzung mit den vorwissenschaftlichen Vorstellungen von Schüler*innen bzw. Student*innen sein und Fehlvorstellungen gegebenenfalls beseitigen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die AR-Lernumgebung fand ich für das chemische Modellverständnis hilfreich.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich würde mich gerne über AR-Lehrmaterialien mit meinen Kolleg*innen austauschen (z.B. gemeinsam entwickeln und kommunizieren).	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich schätze die Kompatibilität der AR-Lernumgebung mit dem schulischen Medienkonzept sehr hoch ein.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

10 Did Gestaltung

DIDAKTISCHE GESTALTUNGSKRITERIEN

11 2. Didaktische Gestaltungskriterien: Zielexplication

Didaktische Gestaltungskriterien

Welche der angeführten Aussagen zu den Lehr- und Lernzielen der AR-Lernumgebung *Elektrolyse von Zinkiodid* treffen hinsichtlich Ihrer persönlichen Einschätzung

Bitte wählen Sie stets eine Antwort aus. Lassen Sie keine der Fragen aus.

	trifft gar nicht zu	trifft weniger zu	trifft weitgehend zu	trifft vollkommen zu
Die Lehr- und Lernziele der AR-Lernumgebung wurden explizit formuliert.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Auswahl der Lehr- und Lernziele in der AR-Lernumgebung wurde begründet.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

12 2. Didaktische Gestaltungskriterien: Angemessenheit der Anforderungen

Didaktische Gestaltungskriterien

Welche der angeführten Aussagen zu den Anforderungen der AR-Lernumgebung *Elektrolyse von Zinkiodid* treffen hinsichtlich Ihrer persönlichen Einschätzung

Bitte wählen Sie stets eine Antwort aus. Lassen Sie keine der Fragen aus.

	trifft gar nicht zu	trifft weniger zu	trifft weitgehend zu	trifft vollkommen zu
--	---------------------	-------------------	----------------------	----------------------

Die AR-Lernumgebung ist unkompliziert zu bedienen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die AR-Lernumgebung bietet alle nötigen Funktionen, um die Aufgabenstellungen bearbeiten zu können.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die AR-Lernumgebung bietet gute Möglichkeiten, sich häufig wiederholende Bearbeitungsvorgänge zu automatisieren.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Mir wurde in der Einführung der AR-Lernumgebung (Bedienungsanleitung) verständlich vermittelt, welche Aufgaben in der AR-Lernumgebung bearbeitet werden sollen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Mir wurde in der Einführung der AR-Lernumgebung (Bedienungsanleitung) verständlich vermittelt, wie ich in den einzelnen Lernpfaden arbeiten soll.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

13 2. Didaktische Gestaltungskriterien: Individualisierbarkeit

Didaktische Gestaltungskriterien

Welche der angeführten Aussagen zur Individualisierbarkeit der AR-Lernumgebung *Elektrolyse von Zinkiodid* treffen hinsichtlich Ihrer persönlichen Einschätzung

Bitte wählen Sie stets eine Antwort aus. Lassen Sie keine der Fragen aus.

	trifft gar nicht zu	trifft weniger zu	trifft weitgehend zu	trifft vollkommen zu
Die AR-Lernumgebung lässt sich ohne großen Aufwand an die persönliche, individuelle Art der Arbeitserledigung anpassen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die AR-Lernumgebung eignet sich für den Einsatz in heterogenen Klassen, da sie sich adaptiv an den unterschiedlichen Kenntnisständen der Schüler*innen bzw. Student*innen orientiert.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Möglichkeiten, die Lerngeschwindigkeit ausreichend an meine individuellen Bedürfnisse anzupassen, sind gegeben.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

14 2. Didaktische Gestaltungskriterien

Didaktische Gestaltungskriterien

Welche der angeführten Aussagen zur problemorientierten Didaktik der AR-Lernumgebung *Elektrolyse von Zinkiodid* treffen hinsichtlich Ihrer persönlichen Ein

Bitte wählen Sie stets eine Antwort aus. Lassen Sie keine der Fragen aus.

	trifft gar nicht zu	trifft weniger zu	trifft weitgehend zu	trifft vollkommen zu
Die Veranschaulichung der Redoxreaktionen bzw. Elektrolyse von Zinkiodid an einem authentischen Fall (dem realen Experiment im Labor) ist für das Verständnis des Donator-Akzeptor-Prinzips hilfreich.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Veranschaulichung der Redoxreaktionen bzw. Elektrolyse von Zinkiodid an einem authentischen Fall (dem realen Experiment im Labor) ist für das Stoff-Teilchen-Konzept-Verständnis hilfreich.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Veranschaulichung der Redoxreaktionen bzw. Elektrolyse von Zinkiodid an einem authentischen Fall (dem realen Experiment im Labor) ist für den Umgang mit chemischen Repräsentationsformen hilfreich.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Veranschaulichung der Redoxreaktionen bzw. Elektrolyse von Zinkiodid an einem authentischen Fall (das reale Experiment im Labor) ist für das Modellverständnis hilfreich.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Veranschaulichung der Redoxreaktionen bzw. Elektrolyse von Zinkiodid an einem authentischen Fall (das reale Experiment im Labor) ist für die Auseinandersetzung mit den vorwissenschaftlichen Vorstellungen von Schüler*innen bzw. Student*innen hilfreich und beseitigt gegebenenfalls Fehlvorstellungen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Einbindung der verschiedenen Repräsentationsformen zur Veranschaulichung der Redoxreaktionen bzw. Elektrolyse von Zinkiodid an einem authentischen Fall (dem realen Experiment im Labor) ist für das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis hilfreich.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Konkrete Aufgabenstellungen in der AR-Lernumgebung sind für das Verständnis von Redoxreaktionen bzw. der Elektrolyse von Zinkiodid auf Stoff- und Teilchenebene hilfreich.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Konkrete Aufgabenstellungen in der AR-Lernumgebung sind für den Umgang mit den chemischen Repräsentationsformen hilfreich.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Konkrete Aufgabenstellungen zum Umgang mit den chemischen Repräsentationsformen in der AR-Lernumgebung sind für das Verständnis von Redoxreaktionen bzw. der Elektrolyse von Zinkiodid auf Stoff- und Teilchenebene hilfreich.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Konkrete Aufgabenstellungen in der AR-Lernumgebung sind für das Modellverständnis hilfreich.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Konkrete Aufgabenstellungen in der AR-Lernumgebung sind für die Auseinandersetzung mit den vorwissenschaftlichen Vorstellungen von Schüler*innen bzw. Student*innen hilfreich und beseitigen gegebenenfalls Fehlvorstellungen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Elektrolyse von Zinkiodid wird aus verschiedenen fachdidaktischen Blickwinkeln betrachtet.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die chemische Fachsprache wird aus verschiedenen fachdidaktischen Blickwinkeln betrachtet.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Das Teilchenmodell wird aus verschiedenen fachdidaktischen Blickwinkeln betrachtet.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
In der AR-Lernumgebung wird die selbstgesteuerte Auseinandersetzung mit Redoxreaktionen bzw. der Elektrolyse von Zinkiodid auf Stoff- und Teilchenebene ermöglicht.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
In der AR-Lernumgebung wird die selbstgesteuerte Auseinandersetzung mit chemischen Repräsentationsformen ermöglicht.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
In der AR-Lernumgebung wird durch die verschiedenen chemischen Repräsentationsformen die selbstgesteuerte Auseinandersetzung mit Redoxreaktionen bzw. der Elektrolyse von Zinkiodid auf Stoff- und Teilchenebene ermöglicht.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Darstellung der chemischen Reaktionen (grüner Lernpfad) durch die verschiedenen Repräsentationsformen in der AR-Lernumgebung könnte auch in meinem/n eigenen CU/LVen thematisiert werden.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Darstellung der Prozesse auf Teilchenebene (rote Lernpfade) durch die verschiedenen Repräsentationsformen in der AR-Lernumgebung könnte auch in meinem/n eigenen CU/LVen thematisiert werden.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Inhalte des Versuchsaufbaus (gelber Lernpfad) in der AR-Lernumgebung könnten auch in meinem/n eigenen CU/LVen thematisiert werden.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

15 Mediendid: allgemein

MEDIENDIDAKTISCHE GESTALTUNGSKRITERIEN:

Allgemein

16 3. Mediendidaktische Gestaltungskriterien

Mediendidaktische Gestaltungskriterien: Allgemein

Welche der angeführten Aussagen zur Steuerung, Selbsterklärungsfähigkeit und Erwartungskonformität der AR-Lernumgebung *Elektrolyse von Zinkiodid* treffen Einschätzung am ehesten zu?

Bitte wählen Sie stets eine Antwort aus. Lassen Sie keine der Fragen aus.

trifft gar nicht zu trifft weniger zu trifft weitgehend zu trifft vollkommen zu

Die AR-Lernumgebung erzwingt keine unnötig starre Einhaltung von Bearbeitungsschritten.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die AR-Lernumgebung ist so gestaltet, dass ich selbst beeinflussen kann, wie und welche Informationen am Bildschirm dargeboten werden.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die AR-Lernumgebung erzwingt keine unnötigen Unterbrechungen der Arbeit.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die AR-Lernumgebung ermöglicht einen leichten Wechsel zwischen und in den einzelnen Lernpfaden.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die AR-Lernumgebung bietet einen guten Überblick über den Aufbau und das Funktionsangebot in den verschiedenen Lernpfaden.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die AR-Lernumgebung verwendet gut verständliche Bedienelemente (z.B. „Weiter“-Button), Begriffe, Bezeichnungen, Abkürzungen oder Symbole in den Masken und Menüs der Lernpfade.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die AR-Lernumgebung liefert in zureichendem Maße Informationen darüber, welche Eingaben für die Bearbeitung der Lernpfade zulässig oder nötig sind.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die AR-Lernumgebung erleichtert die Orientierung in den Lernpfaden durch eine einheitliche Gestaltung.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die AR-Lernumgebung reagiert mit gut vorhersehbaren Bearbeitungszeiten.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die AR-Lernumgebung lässt sich durchgehend nach einem einheitlichen Prinzip bedienen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

17 Mediendid: Verständlichkeit der Medien

MEDIENDIDAKTISCHE GESTALTUNGSKRITERIEN:

Verständlichkeit der Medien

18 3. Mediendidaktische Gestaltungskriterien 2

Mediendidaktische Gestaltungskriterien: Verständlichkeit der Medien

Welche der angeführten Aussagen zur Verständlichkeit der Medien bzw. Darstellungsformen in der AR-Lernumgebung *Elektrolyse von Zinkiodid* treffen hinsichtlich Einschätzung am ehesten zu?

Bitte wählen Sie stets eine Antwort aus. Lassen Sie keine Frage aus.

	trifft gar nicht zu	trifft weniger zu	trifft weitgehend zu	trifft vollkommen zu
Die Texte sind präzise verfasst.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Texte sind verständlich geschrieben.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Texte sind nicht zu lang.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Fachbegriffe werden erklärt.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Bilder sind inhaltlich verständlich.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Symbole sind anschaulich.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Symbole sind inhaltlich verständlich.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Repräsentationsformen sind innerhalb eines Lernpfades inhaltlich aufeinander bezogen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Repräsentationsformen sind sinn- bzw. sachverhaltszusammenhängend auf dem Bildschirm angeordnet.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Repräsentationsformen sind auf dem Bildschirm inhaltlich widerspruchsfrei angeordnet.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Repräsentationsformen sind auf dem Bildschirm räumlich und zeitlich zusammenhängend angeordnet.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die (Schrift-)Größen und Farben der Repräsentationsformen waren gut lesbar.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Das Tempo bei der augmentierten Darstellung der Prozesse auf Teilchenebene (rote Lernpfade) war (durch die Einstellung der Geschwindigkeit) passend.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Die augmentierten Elemente wirken in der Ansicht durch das iPad auf das Experiment nicht gedrängt.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Auswahl an möglichen Informationen in einem Menüpunkt (unterschiedliche Repräsentationsformen), die sich in der Ansicht durch das iPad ein- und ausblenden lassen, war angemessen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

19 Mediendid: Wirkung Medien

MEDIENDIDAKTISCHE GESTALTUNGSKRITERIEN:

Wirkung der Medien

20 3. Mediendidaktische Gestaltungskriterien 3

Mediendidaktische Gestaltungskriterien: Wirkung der Medien

Welche der angeführten Aussagen zur Wirkung der Medien bzw. Darstellungsformen in der AR-Lernumgebung *Elektrolyse von Zinkiodid* treffen hinsichtlich Ihrer Einschätzung am ehesten zu?

Bitte wählen Sie stets eine Antwort aus. Lassen Sie keine Frage aus.

	trifft gar nicht zu	trifft weniger zu	trifft weitgehend zu	trifft vollkommen zu
Das Wissen zu Redoxreaktionen bzw. der Elektrolyse von Zinkiodid kann durch die medialen Visualisierungen auf Stoff- und Teilchenebene vertieft werden.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die mediale Aufbereitung der chemischen Inhalte hat geholfen, Zusammenhänge zum Thema Redoxreaktionen bzw. Elektrolyse von Zinkiodid auf Stoff- und Teilchenebene besser zu verstehen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die mediale Aufbereitung der chemischen Inhalte hat geholfen, fachsprachliche Zusammenhänge zum Thema Redoxreaktionen bzw. Elektrolyse von Zinkiodid besser zu verstehen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Texte sind für das Verständnis von Redoxreaktionen bzw. der Elektrolyse von Zinkiodid auf Stoff- und Teilchenebene hilfreich.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Texte sind für den Umgang mit der chemischen Fachsprache hilfreich.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Texte sind für das Modellverständnis hilfreich.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Texte sind für die Auseinandersetzung mit den vorwissenschaftlichen Vorstellungen von Schüler*innen bzw. Student*innen hilfreich und beseitigen gegebenenfalls Fehlvorstellungen zu Redoxreaktionen bzw. zur Elektrolyse von Zinkiodid.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Bilder sind für das Verständnis von Redoxreaktionen bzw. der Elektrolyse von Zinkiodid auf Stoff und Teilchenebene hilfreich.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Bilder sind für den Umgang mit der chemischen Fachsprache hilfreich.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Bilder sind für das Modellverständnis hilfreich.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Bilder sind für die Auseinandersetzung mit den vorwissenschaftlichen Vorstellungen von Schüler*innen bzw. Student*innen hilfreich und beseitigen gegebenenfalls Fehlvorstellungen zu Redoxreaktionen bzw. zur Elektrolyse von Zinkiodid.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Symbole sind für das Verständnis von Redoxreaktionen bzw. der Elektrolyse von Zinkiodid auf Stoff- und Teilchenebene hilfreich.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Symbole sind für den Umgang mit der chemischen Fachsprache hilfreich.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Symbole sind für das Modellverständnis hilfreich.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Symbole sind für die Auseinandersetzung mit den vorwissenschaftlichen Vorstellungen von Schüler*innen bzw. Student*innen hilfreich und beseitigen gegebenenfalls	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Fehlvorstellungen zu Redoxreaktionen bzw. zur Elektrolyse von Zinkiodid.				
Die Bilder halfen, die Texte besser zu verstehen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Symbole halfen, die Texte besser zu verstehen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die dynamische Darstellung der Prozesse auf Teilchenebene war für das Stoff-Teilchen-Konzept-Verständnis hilfreich.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die dynamische Darstellung der Prozesse auf Teilchenebene war für das Verständnis der chemischen Fachsprache hilfreich.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die dynamische Darstellung der Prozesse auf Teilchenebene war für das chemische Modellverständnis hilfreich.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die dynamische Darstellung der Prozesse auf Teilchenebene war für die Auseinandersetzung mit den vorwissenschaftlichen Vorstellungen von Schüler*innen bzw. Student*innen hilfreich und beseitigt gegebenenfalls Fehlvorstellungen zu Redoxreaktionen bzw. zur Elektrolyse von Zinkiodid.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

21 technische LF

TECHNISCHE LERNFÖRDERLICHKEIT

22 4. Technische Lernförderlichkeit

Technische Lernförderlichkeit

Welche der angeführten Aussagen zur technischen Handhabung der AR-Lernumgebung *Elektrolyse von Zinkiodid* treffen hinsichtlich Ihrer persönlichen Einschä

Bitte wählen Sie stets eine Antwort aus. Lassen Sie keine Frage aus.

	trifft gar nicht zu	trifft weniger zu	trifft weitgehend zu	trifft vollkommen zu
Die Funktionsweisen der AR-Lernumgebung sind gut ohne fremde Hilfe oder Handbuch erlernbar.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die AR-Lernumgebung erfordert wenig Zeit zum Erlernen der Technik und Funktionssteuerung.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Navigation in dem AR-Setting fiel mir leicht.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
In der AR-Lernumgebung waren alle Bedienelemente der Maske, des Menüs und der Übersicht mit den Lernpfaden leicht zu drücken.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich halte die Funktionsleiste mit dem Menü-, Hilfe- und Info-Button für sinnvoll.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich halte die Gesamtübersicht der Lernpfade auf dem Bildschirm (unten links) für sinnvoll.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Insgesamt fiel mir die Orientierung in der AR-Lernumgebung leicht.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich wusste stets, wann ein Lernpfad beendet war.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich wusste stets, wie ich Hilfestellungen in der AR-Lernumgebung erhalte.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich wusste stets, mit welchen Funktionen bzw. Buttons ich zum nächsten Lernpfad gelange.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich wusste, wie ich von Teil 1 „Vor Anschalten der Gleichspannungsquelle“ zu Teil 2 „Nach Anschalten der Gleichspannungsquelle“ gelange.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

23 Did:Lernprozess

DIDAKTIK: LERNPROZESS

24 5. Didaktik: Lernprozess

Didaktik: Lernprozess

Welche der angeführten Aussagen zu der AR-Lernumgebung *Elektrolyse von Zinkiodid* treffen hinsichtlich Ihrer persönlichen Einschätzung für den Einsatz im C

Lehrveranstaltungen (LVen) am ehesten zu?

Bitte wählen Sie stets eine Antwort aus. Lassen Sie keine Frage aus.

	trifft gar nicht zu	trifft weniger zu	trifft weitgehend zu	trifft vollkommen zu
Die Bearbeitung der AR-Lernumgebung sollte das Interesse der Lernenden zu Redoxreaktionen auf Stoff- und Teilchenebene wecken.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Bearbeitung der AR-Lernumgebung sollte das Interesse der Lernenden zum Umgang mit den chemischen Repräsentationsformen wecken.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Bearbeitung der AR-Lernumgebung sollte durch die verschiedenen chemischen Repräsentationsformen das Interesse an Redoxreaktionen auf Stoff- und Teilchenebene wecken.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Das Arbeiten in der AR-Lernumgebung macht Lernenden voraussichtlich Spaß.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die AR-Lernumgebung weckt bei Lernenden voraussichtlich die Neugier am Umgang mit den verschiedenen Repräsentationsformen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die AR-Lernumgebung weckt bei Lernenden voraussichtlich die Neugier an Redoxreaktionen auf Stoff- und Teilchenebene.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Durch die verschiedenen chemischen Repräsentationsformen weckt die AR-Lernumgebung bei Lernenden voraussichtlich die Neugier an Redoxreaktionen auf Stoff- und Teilchenebene.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

25 Did:Lernerfolg

DIDAKTIK: VORAUSSICHTLICHER LERNERFOLG

26 6. Didaktik: voraussichtlicher Lernerfolg / Lerntransfer

Didaktik: voraussichtlicher Lernerfolg

Welche der angeführten Aussagen zu der AR-Lernumgebung *Elektrolyse von Zinkiodid* treffen hinsichtlich Ihrer persönlichen Einschätzung für den Einsatz im C Lehrveranstaltungen (LVen) am ehesten zu?

Bitte wählen Sie stets eine Antwort aus. Lassen Sie keine Frage aus.

	trifft gar nicht zu	trifft weniger zu	trifft weitgehend zu	trifft vollkommen zu
Durch die AR-Lernumgebung können Lernende voraussichtlich selbstreguliert arbeiten.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Durch die AR-Lernumgebung können Lernende voraussichtlich kooperativ arbeiten.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Durch die AR-Lernumgebung können Lernende voraussichtlich kollaborativ arbeiten.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Durch die AR-Lernumgebung können sich Lernende voraussichtlich Wissen über Redoxreaktionen auf Stoff- und Teilchenebene aneignen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Durch die AR-Lernumgebung können sich Lernende voraussichtlich Wissen über die chemische Fachsprache aneignen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Durch die Darstellung der verschiedenen Repräsentationsformen in der AR-Lernumgebung können sich Lernende voraussichtlich Wissen über Redoxreaktionen auf Stoff- auf Teilchenebene aneignen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Durch die AR-Lernumgebung können sich Lernende voraussichtlich Wissen zum chemischen Modellieren aneignen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Durch die AR-Lernumgebung können sich Lernende mit ihren vorwissenschaftlichen Vorstellungen auseinandersetzen und Fehlvorstellungen gegebenenfalls beseitigen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die AR-Lernumgebung sollte Lernenden voraussichtlich helfen, fachsprachliche Zusammenhänge besser zu verstehen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Die AR-Lernumgebung sollte Lernenden voraussichtlich helfen, chemische Zusammenhänge auf Stoff- und Teilchenebene besser zu verstehen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die AR-Lernumgebung sollte durch die Darstellung unterschiedlicher Repräsentationsformen Lernenden voraussichtlich helfen, chemische Zusammenhänge auf Stoff- und Teilchenebene besser zu verstehen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die fachwissenschaftlichen und -didaktischen Inhalte der AR-Lernumgebung sind für den CU bzw. LVen hilfreich.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Den Lernenden sollte durch die Bearbeitung der AR-Lernumgebung klar werden, in welchen praktischen Situationen sie das erworbene Wissen verwenden können.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Orientierung an den verschiedenen Lernpfaden sollte die chemische Fachsprache der Lernenden fördern.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Orientierung an den verschiedenen Lernpfaden sollte das Verständnis von Redoxreaktionen auf Stoff- und Teilchenebene bei Lernenden fördern.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Orientierung an den verschiedenen Lernpfaden sollte durch die Darstellung der verschiedenen Repräsentationsformen das Verständnis von Redoxreaktionen auf Stoff- und Teilchenebene bei Lernenden fördern.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Orientierung an den verschiedenen Lernpfaden sollte die Modellkompetenz bei Lernenden fördern.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Orientierung an den verschiedenen Lernpfaden sollte eine Auseinandersetzung mit den vorwissenschaftlichen Vorstellungen bei Lernenden ermöglichen und Fehlvorstellungen gegebenenfalls beseitigen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Inhalte der AR-Lernumgebung sind für nachfolgende, weitere chemische Themengebiete in der Schule bzw. im Studium hilfreich.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

27 zu Teil 2

Sie haben den ersten Teil des Fragebogens erfolgreich ausgefüllt.

28 Teil 2

TEIL 2

Akzeptanz- und Usabilitytest: Offene Fragen zur Bewertung der Tauglichkeit der AR-Lernumgebung *Elektrolyse*

29 Kopie von Akzeptanz

Akzeptanz- und Usabilitytest: Bewertung der AR-Lernumgebung *Elektrolyse von Zinkiodid*

- Der Akzeptanz- und Usabilitytest wird mit diesem Teil abgeschlossen, indem Ihnen ergänzend zu Teil 1 offene Fragen zur AR-Lernumgebung gestellt werden, die bisher vor dem Hintergrund der Chemie- und Mediendidaktik mit dem Ziel den Nutzen und didaktischen Mehrwert der AR-Lernumgebung für den Einsatz in universitären Lehrveranstaltungen (LVen) zu bewerten.
- Achten Sie auch in diesem Teil darauf, dass Sie die AR-App, neben dem chemischen Inhalt der Redoxreaktionen, **vor dem Hintergrund des Stoff-Teil und des Umgangs mit den chemischen Repräsentationsformen (Texte, Bilder und Symbole)** bewerten.

30 Allgemeines zur AR-Lernumgebung

ALLGEMEINES ZUR AR-LERNUMGEBUNG

31 Offene Fragen zur AR-Lernumgebung 1

ALLGEMEINES ZUR AR-LERNUMGEBUNG

1. Beschreiben Sie, was Ihnen aus fach- und mediendidaktischer Sicht besonders gut an der AR-Lernumgebung gefallen hat.

2. Beschreiben Sie, was Sie aus fach- und mediendidaktischer Sicht an der AR-Lernumgebung verändern bzw. verbessern würden.

3. Reflektieren Sie, welche Vorteile sich durch den Einsatz der AR-Lernumgebung im/n CU/LVen in Vergleich zu herkömmlichen Lernmedien

4. Reflektieren Sie, welche technischen, medien- und fachdidaktischen oder pädagogischen Schwierigkeiten sich bei der Bedienung der AR-L

5. Erklären Sie, welche Informationen, um Wissen zu erwerben, das zur Auswertung des chemischen Experiments Elektrolyse von Zinkiodid i Lernumgebung fehlen und ergänzt werden müssen.

32 STW und AR-Lernumgebung

STOFF- UND TEILCHENEbenen IN DER AR-LERNUMGEBUNG

33 Offene Fragen zur AR-Lernumgebung 2

STOFF- UND TEILCHENEbenen IN DER AR-LERNUMGEBUNG

6. Reflektieren Sie, ob die AR-Lernumgebung unterstützend für Ihre Beschreibungen und Erläuterungen zu den chemischen Prozessen des E: Zinkiodid auf Stoff- und Teilchenebene wirkte. Bitte begründen Sie kurz Ihre Einschätzung.

7. Reflektieren Sie, ob Sie die AR-Lernumgebung motiviert hat, sich bewusst mit dem Wechsel von Stoff- auf Teilchenebene auseinanderzuse

8. Erklären Sie, welche Informationen in der AR-Lernumgebung fehlen, um den Wechsel von Stoff- auf Teilchenebene besser zu verdeutliche

34 (M)ER und AR-Lernumgebung

REPRÄSENTATIONSFORMEN IN DER AR-LERNUMGEBUNG

35 Offene Fragen zur AR-Lernumgebung 3

REPRÄSENTATIONSFORMEN IN DER AR-LERNUMGEBUNG

9. Reflektieren Sie, ob die AR-Lernumgebung unterstützend für Ihre Beschreibungen und Erläuterungen zu den chemischen Prozessen des E: Zinkiodid mithilfe der unterschiedlichen chemischen Repräsentationsformen wirkte? Bitte begründen Sie kurz Ihre Einschätzung.

10. Reflektieren Sie, ob Sie die AR-Lernumgebung motiviert hat, sich bewusst mit den unterschiedlichen chemischen Repräsentationsformen Wechseln auseinanderzusetzen?

11. Erklären Sie, welche Informationen in der AR-Lernumgebung fehlen, um die verschiedenen chemischen Repräsentationsformen und deren zu verdeutlichen?

36 zu Teil 3

Sie haben den zweiten Teil des Fragebogens erfolgreich ausgefüllt.

37 Teil 3

TEIL 3

Testaufgaben aus der Chemie - Lautes Denken

38 Testaufgabe Einführung

Zwei Testaufgaben aus der Chemie - Elaboration per lautem Denken

- Im Folgenden bearbeiten Sie, analog zur 1. digitalen Befragung, sechs Aufgaben aus der Chemie mit der Methode des lauten Denkens.
- Dabei steht **insbesondere** Ihr Elaborationsprozess im Vordergrund. **Äußern** Sie daher **alle Gedankengänge laut** und erklären Sie mithilfe Donator-Akzeptor-Prinzip (**ohne zusätzlicher Materialien**) Ihr Vorgehen bei der Bearbeitung der beiden Testaufgaben.
- Bitte verwenden Sie hierfür **zusätzlich zu den Textfeldern** für schriftliche Erläuterungen **das Mikrofon** und einen **Zettel für Zeichnungen**.

39 Aufwärmübung: Think Aloud

Sollten Sie mit der Methode des lauten Denken bisweilen noch nicht vertraut sein, können Sie vor der Bearbeitung der Testaufgaben eine Aufwärmübung zum lauten Denken durchführen.

Möchten Sie sich aufwärmen und das laute Denken trainieren?

- ja, ich möchte an einer Aufwärmübung teilnehmen.
- nein, ich fühle mich sicher mit der Methode des lauten Denkens und möchte mit der Bearbeitung beginnen.

39.1.1 Aufwärmübung

Aufwärmübung zum lauten Denken

Es werden Ihnen zwei Übungsaufgaben vorgelegt. Bearbeiten Sie diese. Das Mikrofon muss in der Aufwärmphase nicht aktiviert werden. Auch ist keine Ergebniseingabe erforderlich. Diese Phase soll Ihnen lediglich Sicherheit im Umgang mit dem lauten Denken geben.

Sprechen Sie stets laut aus, welche Gedankengänge Sie bei der Testbearbeitung durchlaufen. Die Methode des lauten Denkens zielt auf das Äußern von Erkenntnissen usw. ab.

Äußern Sie auch bei Unwissenheit oder Unsicherheit laut Ihre Gedanken.

39.1.2 Aufwärmübung

Addition, Subtraktion und Division

Berechnen Sie folgende Aufgabe, indem Sie laut Ihre Gedankengänge äußern:

$$1,5 + 2 : 50 - 52 =$$

39.1.3 Aufwärmübung

Schätzaufgabe

Schätzen Sie, wie viele Schafe sich auf der Wiese befinden. Äußern Sie laut Ihr Vorgehen.



39.1.4 Aufwärmübung selbst

Wenn Sie sich sicher mit der Methode des lauten Denkens fühlen, klicken Sie auf den Weiter-Button.

Bei Unsicherheiten wird ein weiteres Aufwärmtraining empfohlen:

Betrachten Sie ein Regal in dem Raum, indem Sie sich befinden und schätzen Sie die darin befindlichen Gegenstände oder berechnen Sie $(5 + 1)$ erklären Sie den Vorgang eines beliebigen Themas.
Denken Sie stets daran alle Gedankengänge laut zu äußern.

40 Sicher im Lauten Denken

Sie fühlen sich sicher mit der Methode des lauten Denkens, so gelangen Sie auf der nächsten Seite zur ersten Testaufgabe.

Bitte drücken Sie bevor sie mit der Aufgabenbearbeitung starten und den Weiter-Button klicken auf den **Aufnahmeknopf Ihres Mikrofons**.

Sobald Sie die erste Aufgabe abgeschlossen haben, beenden Sie die Tonaufnahme und laden die Audio-Datei hoch. Für die weiteren Testaufgabe Vorgehen.

Hinweis: Erfolgt die Testbearbeitung im Labor in Anwesenheit der Kursleitung, so können Sie eine Gesamt-Tonaufnahme mit allen sechs Aufgaben Ende der Testung abgeben.

41 Testaufgaben per lautem Denken

Testaufgabe 1

Bei der Reaktion von Metallen mit Nichtmetallen entstehen durch Elektronenübergänge Salze, die aus Kationen und Anionen bestehen. Ein typischer Vertreter einer solchen Synthesereaktion ist das Natriumchlorid, auch Kochsalz genannt. Das Salz hat völlig andere Eigenschaften als die Elemente Natrium mit der Ordnungszahl 11 und Chlor mit der Ordnungszahl 17. Skizzieren Sie die chemischen Vorgänge bei der Synthese von Natriumchlorid aus seinen Elementen an einem geeigneten Modell Ihrer Wahl. Erklären Sie die chemischen Hintergründe bei der Synthese auf Stoff- und Teilchenebene und beschreiben Sie die Grenzen des verwendeten Modells.

Das Textfeld steht Ihnen für schriftliche Erläuterungen zur Verfügung.

Bitte denken Sie daran den Aufnahmeknopf Ihres Mikrofons aktiviert zu haben.

Upload

Bitte laden Sie hier Ihre Tonaufnahme im .mp3-Dateiformat (max. 8 MB) hoch.

Hinweis: Sollte Ihre Audio Datei größer als 8 MB sein, so teilen Sie die Gesamtdatei in zwei bis drei kleinere Tonaufnahmen (jeweils max. 8 MB) in zusätzlichen Upload-Fenstern hoch. Achten Sie darauf, dass Ihre Dateien chronologisch nummeriert sind. Bitte befolgen Sie hierfür die Anleitung Schneiden und Speichern von großen Audio Dateien: [Bitte klicken Sie auf den Link](#).

Dateiname	<input type="text"/>
Dateigröße	<input type="text"/>
Dateiname	<input type="text"/>
Dateigröße	<input type="text"/>
Dateiname	<input type="text"/>
Dateigröße	<input type="text"/>

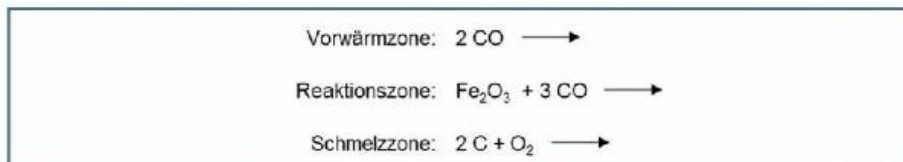
42 Testaufgaben per lautem Denken

Auf der nächsten Seite befindet sich die zweite Testaufgabe.
Sobald Sie mit der Bearbeitung beginnen möchten, drücken Sie **erneut** auf den **Aufnahmeknopf Ihres Mikrofons**.

43 Testaufgaben per lautem Denken

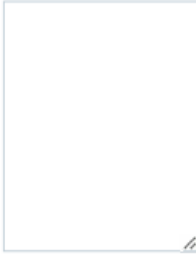
Testaufgabe 2

In modernen Industriegesellschaften spielt Stahl eine wichtige Rolle. Bei Stahl handelt es sich um Eisen, das mit anderen Stoffen verbunden ist. Das Eisen für die Stahlproduktion wird mithilfe von Redoxreaktionen in Hochöfen gewonnen. Ein Hochofen ist ein schachtförmiges Bauwerk, das nach dem Gegenstromprinzip arbeitet: Grobkörniges Eisenerz, Koks und Zusatzstoffe werden von oben in den Hochofen eingefüllt, während die Gase von unten nach oben strömen und als Gichtgas den Hochofen verlassen. Erklären Sie mithilfe der im Kasten angeführten Informationen zu den Hochofenprozessen die Herstellung von Eisen auf Stoff- und Teilchenebene. Gehen Sie dabei auf die einzelnen Redoxreaktionen ein und fertigen Sie eine geeignete Skizze an. Achten Sie auf eine geeignete chemische Fachsprache.



Das Textfeld steht Ihnen für schriftliche Erläuterungen zur Verfügung.

Bitte denken Sie daran den Aufnahmeknopf Ihres Mikrofons aktiviert zu haben.



Upload

Bitte laden Sie hier Ihre Tonaufnahme im .mp3-Dateiformat (max. 8 MB) hoch.

Hinweis: Sollte Ihre Audio Datei größer als 8 MB sein, so teilen Sie die Gesamtdatei in zwei bis drei kleinere Tonaufnahmen (jeweils max. 8 MB) zusätzlichen Upload-Fenstern hoch. Achten Sie darauf, dass Ihre Dateien chronologisch nummeriert sind. Bitte befolgen Sie hierfür die Anleitung Schneiden und Speichern von großen Audio Dateien: [Bitte klicken Sie auf den Link](#)

Dateiname	<input type="text"/>
Dateigröße	<input type="text"/>
Dateiname	<input type="text"/>
Dateigröße	<input type="text"/>
Dateiname	<input type="text"/>
Dateigröße	<input type="text"/>

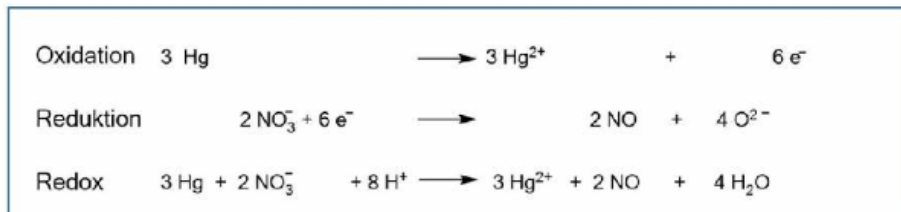
44. Testaufgaben per lautem Denken

Auf der nächsten Seite befindet sich die dritte Testaufgabe.
Sobald Sie mit der Bearbeitung beginnen möchten, drücken Sie **erneut** auf den **Aufnahmeknopf Ihres Mikrofons**.

45. Testaufgaben per lautem Denken

Testaufgabe 3

Es ist eine Gesamtgleichung mit ihren Teilgleichungen gegeben:



Die folgenden Aussagen a) bis f) sollen die im Kasten angeführten chemischen Reaktionen beschreiben. Die verschiedenen Lösungen stützen sich auf gängige Schülervorstellungen. Diskutieren Sie alle der angeführten Aussagen vor dem Hintergrund der chemischen Fachsprache und der Stoff- sowie Teilchenebenen. Bewerten Sie die Schülervorstellungen, die sich in den Aussagen widerfinden, aus fachlicher Perspektive und nennen Sie gegebenenfalls Verbesserungsvorschläge.

- a) Bei der Reduktion von farbloser, flüssiger Salpetersäure entsteht farbloses, gasförmiges Stickstoffmonoxid.
- b) Bei der Reduktion von Nitrat NO_3^- entsteht das farb- und geruchslose, giftige Gas NO .
- c) Das silbrig-glänzende Schwermetall Quecksilber Hg wird als Reduktionsmittel zu drei zweifach positiv-geladenen Quecksilberionen oxidiert.
- d) Drei Quecksilberatome, $3 Hg$, werden als Oxidationsmittel zu Quecksilberionen Hg^{2+} oxidiert.
- e) Bei der Reduktion von Nitrat NO_3^- und der damit einhergehenden Oxidation von Quecksilber entstehen Quecksilber (II)-Ionen, NO und Wasser.
- f) Das silbrig-glänzende Schwermetall Quecksilber wird als Oxidationsmittel durch Abgabe von sechs Elektronen reduziert. Es liegen sodann Quecksilberionen in Wasser und oxidiertes Stickstoffmonoxid vor.

Bitte denken Sie daran den Aufnahmeknopf Ihres Mikrofons aktiviert zu haben.

Die Textfelder stehen Ihnen für schriftliche Erläuterungen zur Verfügung.

a)	<input type="text"/>
b)	<input type="text"/>
c)	<input type="text"/>
d)	<input type="text"/>
e)	<input type="text"/>
f)	<input type="text"/>

Dieses Textfeld bietet Ihnen die Gelegenheit (je nach Bedarf) zusätzliche Erläuterungen anzuführen.

Upload

Bitte laden Sie hier Ihre Tonaufnahme im .mp3-Dateiformat (max. 8 MB) hoch.

Hinweis: Sollte Ihre Audio Datei größer als 8 MB sein, so teilen Sie die Gesamtdatei in zwei bis drei kleinere Tonaufnahmen (jeweils max. 8 MB) in zusätzlichen Upload-Fenstern hoch. Achten Sie darauf, dass Ihre Dateien chronologisch nummeriert sind. Bitte befolgen Sie hierfür die Anleitung **Schneiden und Speichern von großen Audio Dateien:** [Bitte klicken Sie auf den Link](#)

Dateiname	<input type="text"/>
Dateigröße	<input type="text"/>
Dateiname	<input type="text"/>
Dateigröße	<input type="text"/>
Dateiname	<input type="text"/>
Dateigröße	<input type="text"/>

46 Testaufgaben per lautem Denken

Auf der nächsten Seite befindet sich die vierte Testaufgabe. Sobald Sie mit der Bearbeitung beginnen möchten, drücken Sie **erneut** auf den **Aufnahmeknopf Ihres Mikrofons**.

47 Testaufgaben per lautem Denken

Testaufgabe 4

Donator-Akzeptor-Reaktionen stellen einen grundlegenden Mechanismus in der Chemie dar. Eine Protolyse ist ein Vertreter dieser Reaktionen. Sie bezeichnet den Übergang eines Protons von einem Molekül auf ein anderes. Das Molekül von dem das Proton abgeht nennt man Protonendonator. Das Molekül, welches das Proton aufnimmt, nennt man Protonenakzeptor. Beschreiben Sie die Vorgänge der Protolyse mithilfe geeigneter, chemischer Repräsentationsformen Ihrer Wahl. Erklären Sie die chemischen Hintergründe unter Verwendung oben genannter Fachbegriffe auf Stoff- und Teilchenebene.

Das Textfeld steht Ihnen für schriftliche Erläuterungen zur Verfügung.

Bitte denken Sie daran den Aufnahmeknopf Ihres Mikrofons aktiviert zu haben.

Upload

Bitte laden Sie hier Ihre Tonaufnahme im .mp3-Dateiformat (max. 8 MB) hoch.

Hinweis: Sollte Ihre Audio Datei größer als 8 MB sein, so teilen Sie die Gesamtdatei in zwei bis drei kleinere Tonaufnahmen (jeweils max. 8 MB) zusätzlichen Upload-Fenstern hoch. Achten Sie darauf, dass Ihre Dateien chronologisch nummeriert sind. Bitte befolgen Sie hierfür die Anleihe Schnelden und Speichern von großen Audio Dateien: [Bitte klicken Sie auf den Link](#)

Dateiname	<input type="text"/>
Dateigröße	<input type="text"/>
Dateiname	<input type="text"/>
Dateigröße	<input type="text"/>
Dateiname	<input type="text"/>
Dateigröße	<input type="text"/>

48 Testaufgaben per lautem Denken

Auf der nächsten Seite befindet sich die fünfte Testaufgabe.
Sobald Sie mit der Bearbeitung beginnen möchten, drücken Sie **erneut** auf den **Aufnahmeknopf Ihres Mikrofons**.

49 Testaufgaben per lautem Denken

Testaufgabe 5



Bitte denken Sie daran den Aufnahmeknopf Ihres Mikrofons aktiviert zu haben.

Die Textfelder stehen Ihnen für schriftliche Erläuterungen zur Verfügung.

- a)
- b)
- c)
- d)
- e)
- f)

Dieses Textfeld bietet Ihnen die Gelegenheit (je nach Bedarf) zusätzliche Erläuterungen anzuführen.

Upload



Bitte laden Sie hier Ihre Tonaufnahme im .mp3-Dateiformat (max. 8 MB) hoch.

Hinweis: Sollte Ihre Audio Datei größer als 8 MB sein, so teilen Sie die Gesamtdatei in zwei bis drei kleinere Tonaufnahmen (jeweils max. 8 MB) in zusätzlichen Upload-Fenstern hoch. Achten Sie darauf, dass Ihre Dateien chronologisch nummeriert sind. Bitte befolgen Sie hierfür die Anleitung **Schneiden und Speichern von großen Audio Dateien:** [Bitte klicken Sie auf den Link](#)

Dateiname	<input type="text"/>
Dateigröße	<input type="text"/>
Dateiname	<input type="text"/>
Dateigröße	<input type="text"/>
Dateiname	<input type="text"/>
Dateigröße	<input type="text"/>

50 Testaufgaben per lautem Denken

Auf der nächsten Seite befindet sich die sechste und damit letzte Aufgabe des Fragebogens. Sobald Sie mit der Bearbeitung beginnen möchten, drücken Sie **erneut** auf den **Aufnahmeknopf Ihres Mikrofons**.

51 Testaufgaben per lautem Denken

Testaufgabe 6

Galvanisieren ist das elektrolytische Überziehen von (meist) unedlen Metallen mit haftenden (edleren) Metallüberzügen. Auf diese Weise können Metalle vor Korrosion geschützt werden. Je nachdem, welches Metall als Überzug verwendet wird, spricht man von Vernickelung, Verchromung usw. Durch Anlegen einer elektrischen Spannung gehen die Atome des Überzugsmetalls als Ionen in Lösung und scheiden sich am unedleren Metall ab. Skizzieren Sie einen Versuchsaufbau zum Verchromen eines Eisenschlüssels (Hinweis: Chromsulfat-Lösung) und erklären Sie die chemischen Hintergründe auf Stoff- und Teilchenebene. Achten Sie auf eine geeignete chemische Fachsprache.

Das Textfeld steht Ihnen für schriftliche Erläuterungen zur Verfügung.

Bitte denken Sie daran den Aufnahmeknopf Ihres Mikrofons aktiviert zu haben.

Upload 

Bitte laden Sie hier Ihre Tonaufnahme im .mp3-Dateiformat (max. 8 MB) hoch.

Hinweis: Sollte Ihre Audio Datei größer als 8 MB sein, so teilen Sie die Gesamtdatei in zwei bis drei kleinere Tonaufnahmen (jeweils max. 8 MB) zusätzlichen Upload-Fenstern hoch. Achten Sie darauf, dass Ihre Dateien chronologisch nummeriert sind. Bitte befolgen Sie hierfür die Anleit
Schneiden und Speichern von großen Audio Dateien: [Bitte klicken Sie auf den Link](#)

Dateiname

Dateigröße

Dateiname

Dateigröße

Dateiname

Dateigröße

52 Endseite

Vielen Dank, dass Sie sich die Zeit genommen haben an der Befragung teilzunehmen.

Die Studie ist nun offiziell beendet

Für Rückfragen steht Ihnen die **Beauftragte Melanie Ripsam** (eMail: melanie.ripsam@tum.de oder Tel: 0176 83 21 67 22) jederzeit zur Verfügung.

A.1.2 Itemanalysen für die Testentwicklung

A.1.2.1 Skala *Einstellungen hinsichtlich digitaler Medien*

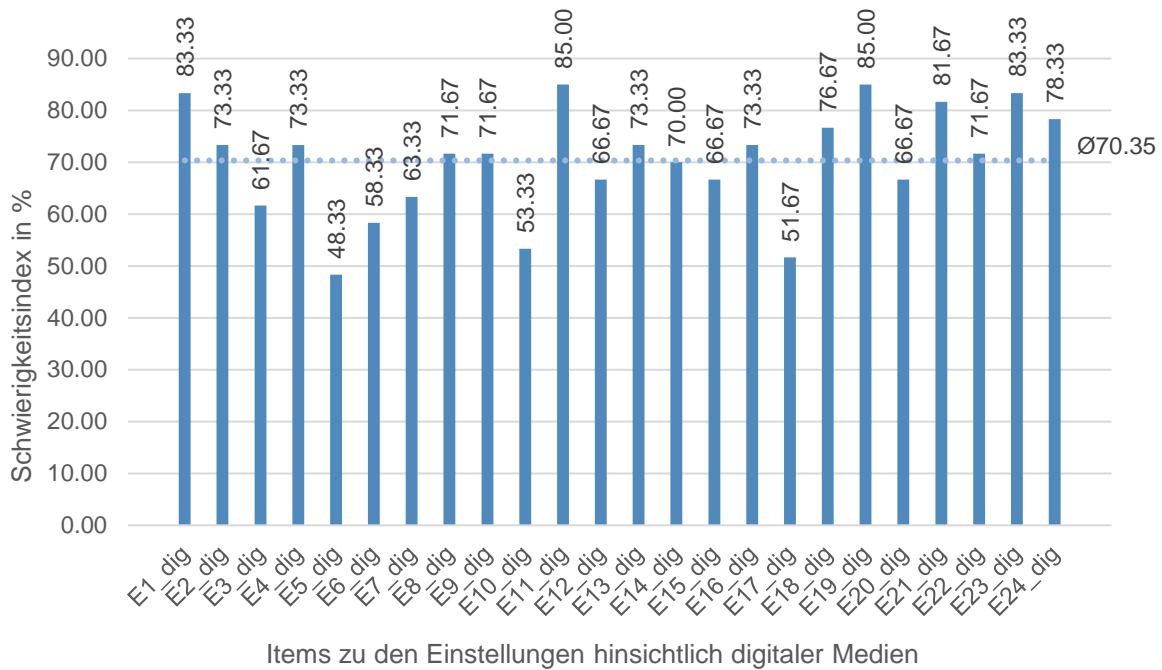
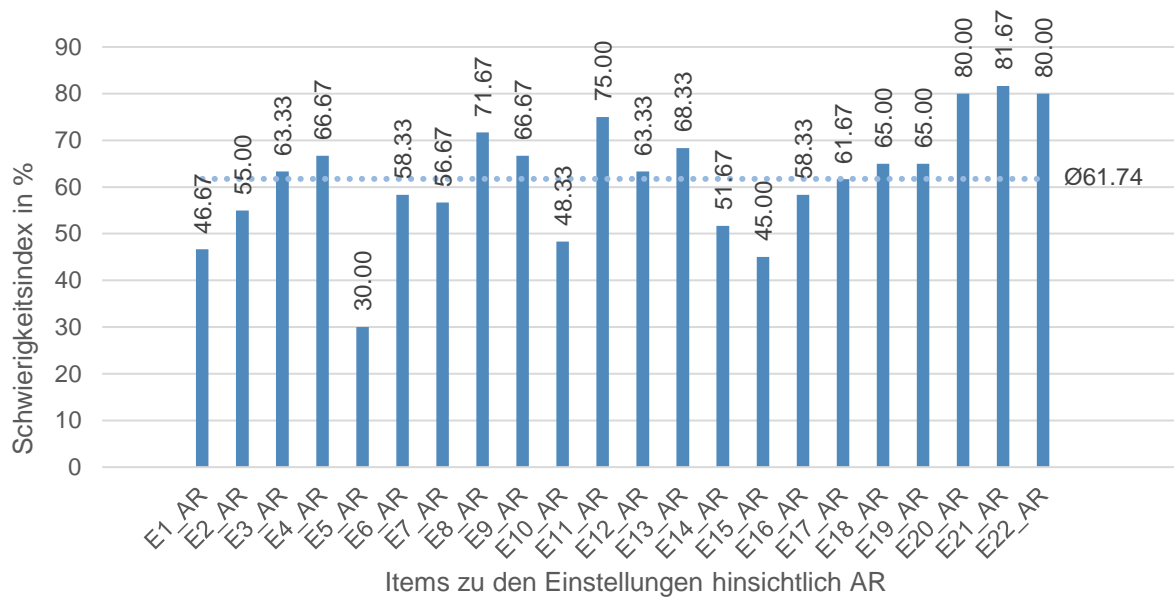


Abbildung A1. Itemschwierigkeiten der Skala *Einstellungen hinsichtlich digitaler Medien*.

Tabelle A1. Trennschärpen der Skala *Einstellungen hinsichtlich digitaler Medien*.

Items	Trennschärfe		
	mit allen Items ($\alpha = .864$)	ohne E21_dig ($\alpha = .872$)	ohne E21_dig und E20_dig ($\alpha = .876$)
E2_dig ... E6_dig	>.335	>.3	>.367
E7_dig	.199	.203	.144
E8_dig	.240	.271	.265
E9_dig ... E12_dig	>.578	>.549	>.524
E14_dig	.164	.135	.156
E15_dig ... E18_dig	>.5	>.5	.535
E20_dig	.265	.269	-
E21_dig	.086	-	-
E22_dig	.583	.579	.631
E24_dig	.335	.349	.356

A.1.2.2 Skala *Einstellungen hinsichtlich AR*Abbildung A2. Itemschwierigkeiten der Skala *Einstellungen hinsichtlich AR*.Tabelle A2. Trennschärfen der Skala *Einstellungen hinsichtlich AR*.

Items	Trennschärfe	
	mit allen Items ($\alpha = .905$)	ohne E19_AR ($\alpha = .915$)
E1_AR ... E7_AR	>.349	>.381
E8_AR	.261	.273
E9_AR ... E18_AR	>.343	>.331
E19_AR	.099	-
E20_AR ... E22_AR	>.638	>.477

A.1.2.3 Skala Selbstwirksamkeitserwartungen hinsichtlich digitaler Medien und AR

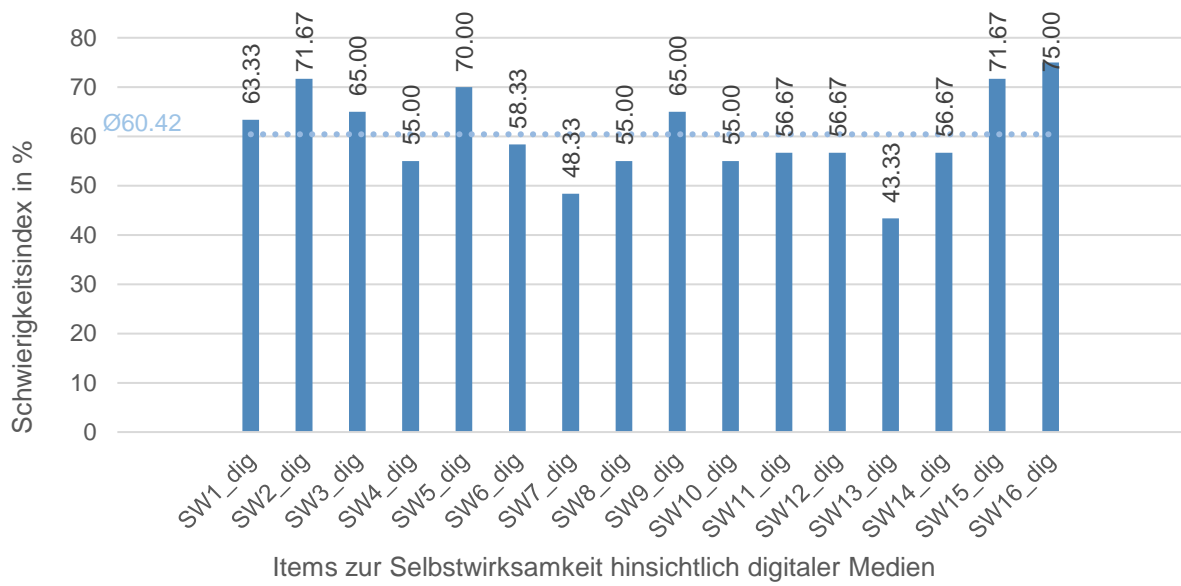


Abbildung A3. Itemschwierigkeiten der Skala Selbstwirksamkeit hinsichtlich digitaler Medien.

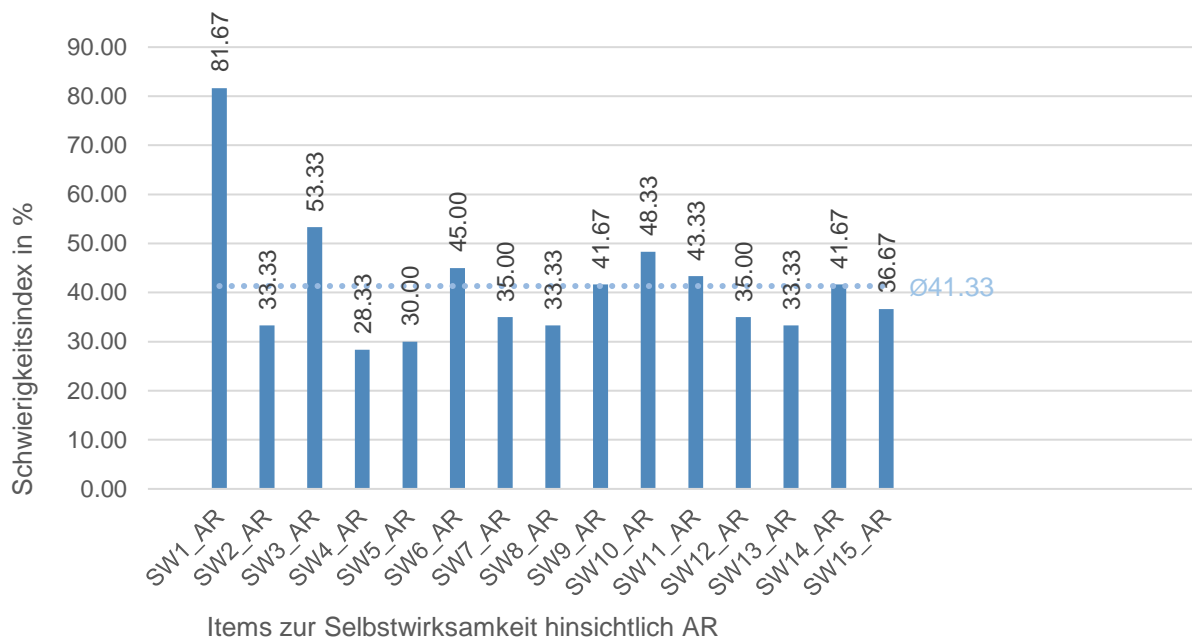


Abbildung A4. Itemschwierigkeiten der Skala Selbstwirksamkeit hinsichtlich AR.

A.1.3 Itemanalyse zur Akzeptanz und Usability

A.1.3.1 Skala Akzeptanz

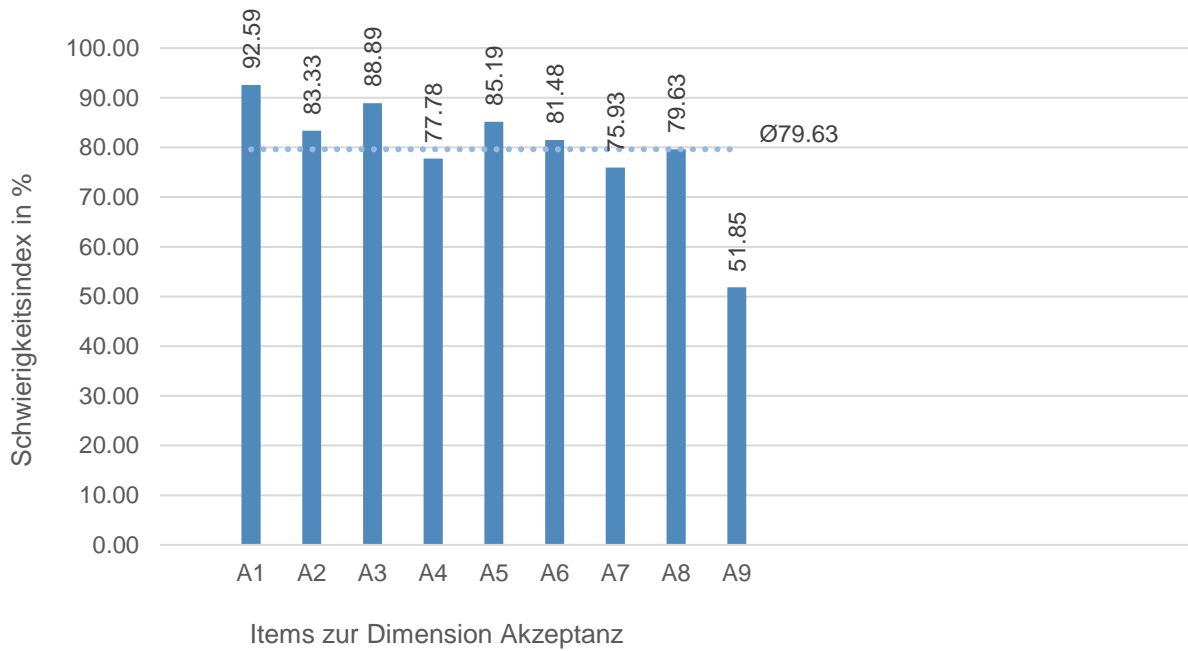


Abbildung A5 Itemschwierigkeiten der Dimension Akzeptanz.

A.1.3.2 Skalen der didaktischen Gestaltungskriterien

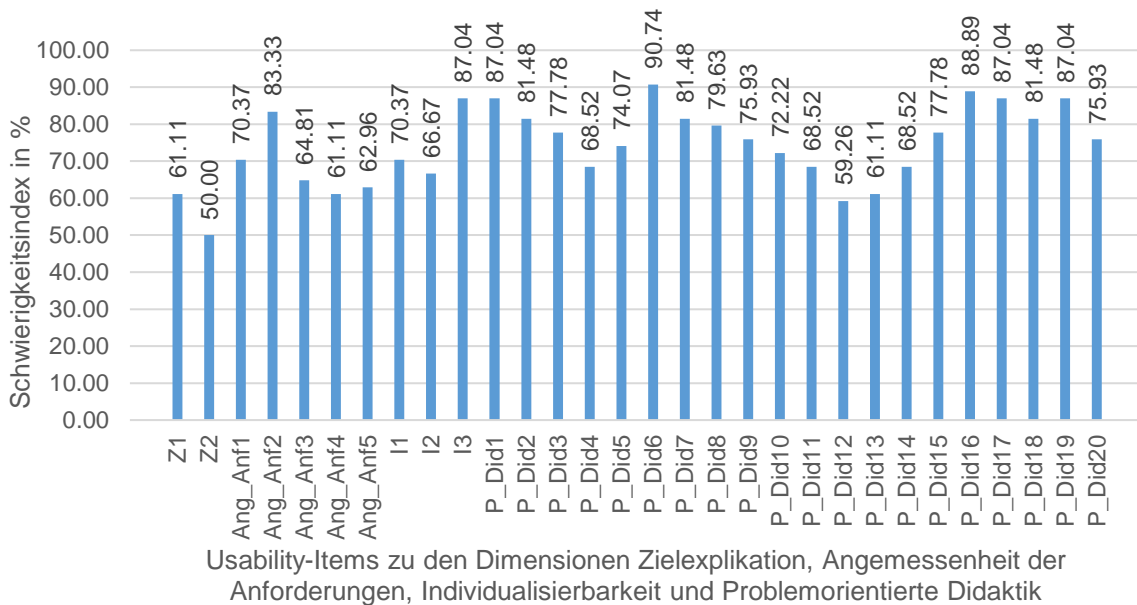
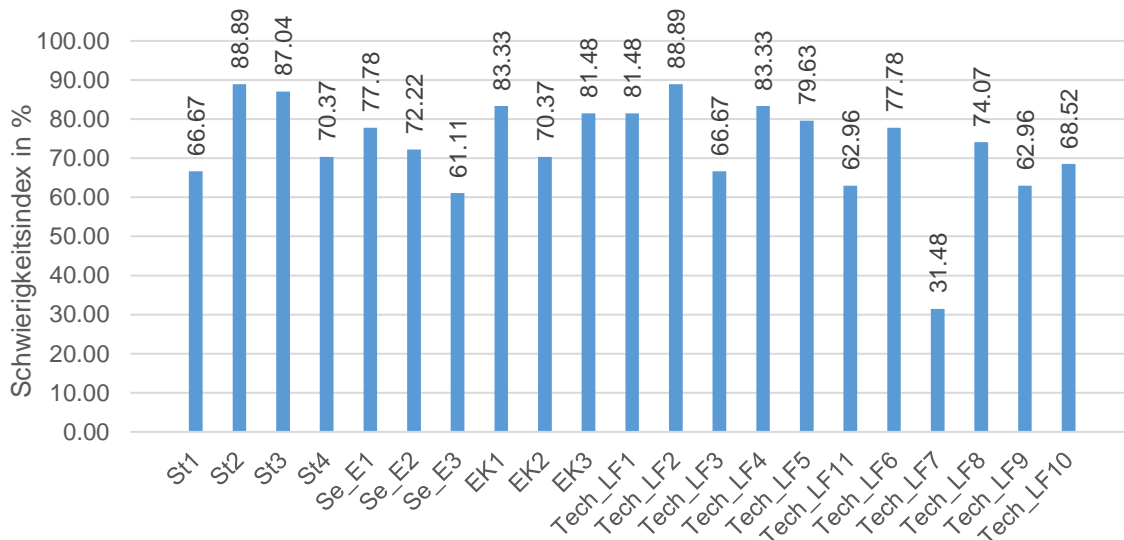


Abbildung A6. Itemschwierigkeiten der Skalen der didaktische Gestaltungskriterien.

Tabelle A3. Übersicht der Items mit auffälligen Schwierigkeiten und/oder Trennschärften aus dem Subkonstrukt Didaktische Gestaltung (Angemessenheit der Anforderungen, Individualisierbarkeit und Problemorientierte Didaktik) mit zugehöriger Maßnahme (Anpassung bzw. Eliminierung), Skalenreliabilität sowie Folgen für die Skalenanpassung.

Dimension	Item	Auffälligkeit		Maßnahme		Skalenreliabilität nach Maßnahme	Folge
		Schwierigkeit in %	Trennschärfe	Anpas.	Elim.		
Angemessenheit der Anforderung	Ang_Anf1	-	.128	Nein	Ja	.542	Skalene Neubildung
	Ang_Anf2	83.33	-	nein	ja		
Individualisierbarkeit	I3	87.04	-	Ja	Nein	.604	Skalene Neubildung
Problemorientierte Didaktik	P_Did1	87.04	-	Nein	Ja	.885	keine
	P_Did2	81.48	.204	ja	nein		
	P_Did4	-	-	nein	ja		
	P_Did6	90.74	-	ja	nein		
	P_Did7	81.48	-	ja	nein		
	P_Did10	-	-	nein	ja		
	P_Did16	88.89	-	ja	nein		
	P_Did17	80.04	-	ja	nein		
	P_Did18	81.48	-	-	-		
P_Did19	87.04	-	ja	nein			

A.1.3.3 Skalen der mediendidaktischen Gestaltungskriterien



Usability-Items zu den Dimensionen Steuerbarkeit, Selbsterklärungsfähigkeit, Erwartungskonformität und technische Lernförderlichkeit

Abbildung A7. Itemschwierigkeiten Skalen der mediendidaktischen Gestaltungskriterien hinsichtlich der Dimensionen *Steuerbarkeit*, *Selbsterklärungsfähigkeit*, *Erwartungskonformität* und *technische Lernförderlichkeit*.

Tabelle A4. Übersicht der Items mit auffälligen Schwierigkeiten und/oder Trennschärfen aus dem Subkonstrukt Mediendidaktische Gestaltung (Steuerbarkeit, Selbsterklärungsfähigkeit, Erwartungskonformität und Technische Lernförderlichkeit) mit zugehöriger Maßnahme (Anpassung bzw. Eliminierung), Skalenreliabilität sowie Folgen für die Skalenanpassung.

Dimension	Item	Auffälligkeit		Maßnahme		Skalenreliabilität	Folge
		Schwierigkeit in %	Trennschärfe	Anpas.	Elim.		
Steuerbarkeit	St1	-	.223	Nein	Ja	.43	Skalenneubildung
	St2	88.89	-	-	-		
	St3	87.04	-	nein	ja		
	St4	-	.075	-	-		
Selbsterklärungsfähigkeit	Se_E1	-	.069	Ja	Nein	.042	Skalenneubildung
	Se_E2	-	-.029	-	-		
	Se_E3	-	.029	nein	ja		
Erwartungskonformität	EK1	83.33	-	Nein	Ja	.708	Skalenneubildung
	EK2	-	-	nein	ja		
	EK3	81.48	-	-	-		
Techn. Lernförderlichkeit	Tech_LF1	81.48	.292	-	-	.675	Skalenneubildung
	Tech_LF2	88.89	-	nein	ja		
	Tech_LF4	8333	-	nein	ja		
	Tech_LF8	-	.217	-	-		
	Tech_LF11	-	-.12	nein	ja		

A.1.3.4 Weitere Skalen der mediendidaktischen Gestaltungskriterien.

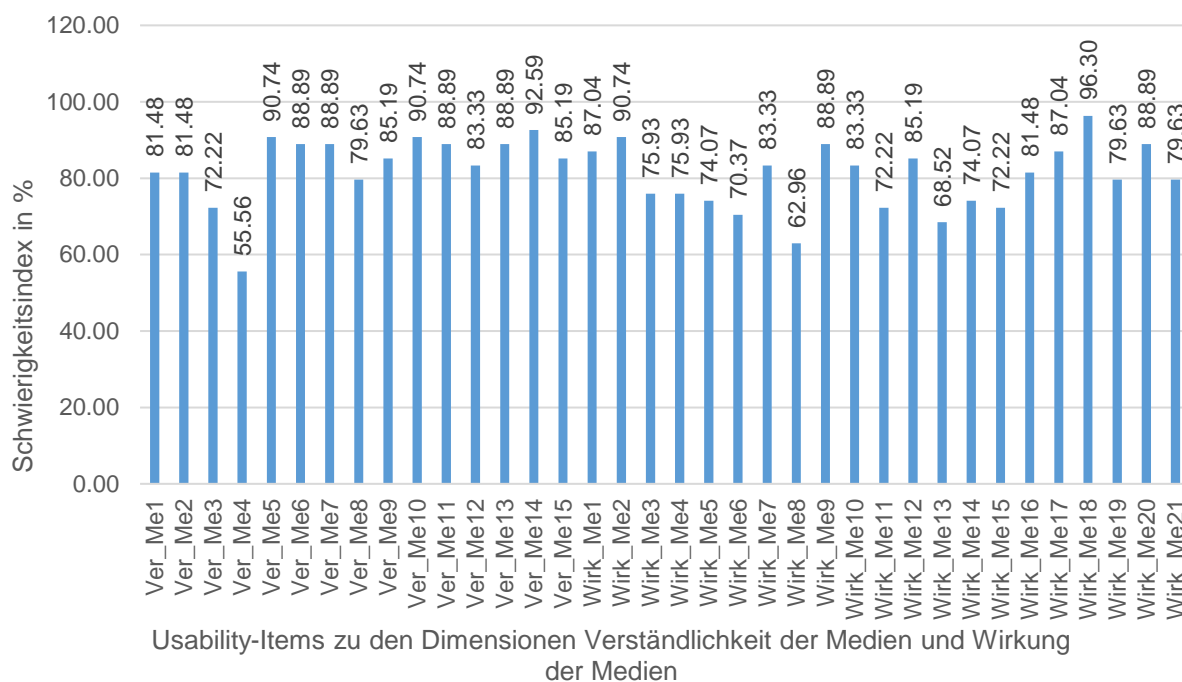


Abbildung A8. Itemschwierigkeiten weiterer Skalen der mediendidaktischen Gestaltungskriterien hinsichtlich der Dimensionen *Verständlichkeit* und *Wirkung der Medien*.

Tabelle A5. Übersicht der Items mit auffälligen Schwierigkeiten und/oder Trennschärfen aus dem Subkonstrukt Mediendidaktische Gestaltung (Verständlichkeit und Wirkung der Medien) mit zugehöriger Maßnahme (Anpassung bzw. Eliminierung), Skalenreliabilität sowie Folgen für die Skalenanpassung.

Dimension	Item	Auffälligkeit		Maßnahme		Skalenreliabilität	Folge			
		Schwierigkeit in %	Trennschärfe	Anpas.	Elim.					
Verständlichkeit der Medien	Ver_Me1	81.48	-	Nein	Ja	.827	keine			
	Ver_Me2	81.48	-	ja	nein					
	Ver_Me5	90.74	.234	ja	nein					
	Ver_Me6	88.89	-	nein	ja					
	Ver_Me7	88.89	-	ja	nein					
	Ver_Me9	85.19	-	ja	nein					
	Ver_Me10	90.74	-	nein	ja					
	Ver_Me11	88.89	.255	-	-					
	Ver_Me12	83.39	-	ja	nein					
	Ver_Me13	88.89	-	ja	nein					
	Ver_Me14	92.59	-	ja	nein					
	Ver_Me15	85.19	-	ja	nein					
	Wirkung der Medien	Wirk_Me1	87.04	.234	ja			nein	.828	keine
		Wirk_Me2	90.74	-	ja			nein		
		Wirk_Me5	-	-	nein			ja		
Wirk_Me7		83.33	.175	ja	nein					
Wirk_Me9		88.89	.121	ja	nein					
Wirk_Me10		83.33	-	nein	ja					
Wirk_Me12		85.19	.138	ja	nein					
Wirk_Me14		-	-	nein	ja					
Wirk_Me16		81.48	-	nein	ja					
Wirk_Me17		87.04	-	nein	ja					
Wirk_Me18		96.30	-.076	ja	nein					
Wirk_Me19		-	.171	-	-					
Wirk_Me20		88.89	-	nein	ja					

A.1.3.5 Skalen zur Didaktik: Schultransfer

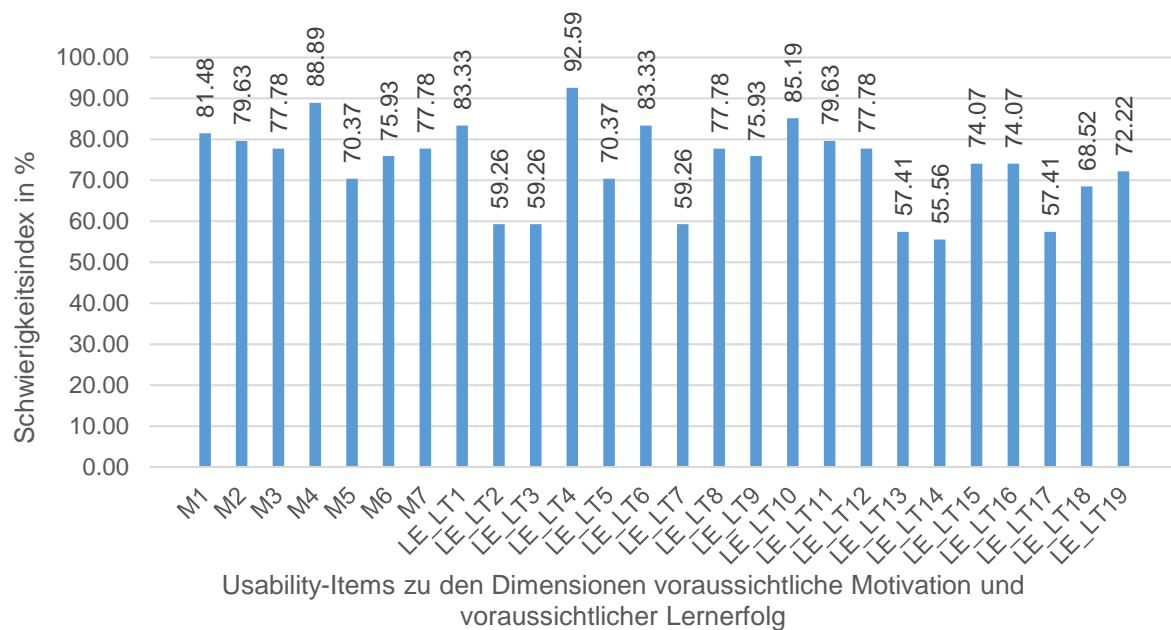


Abbildung A9. Itemschwierigkeiten der Skalen zur Didaktik: Schultransfer.

Tabelle A6. Übersicht der Items mit auffälligen Schwierigkeiten und/oder Trennschärfen aus dem Subkonstrukt Schultransfer (voraussichtliche Motivation und voraussichtlicher Lernerfolg) mit zugehöriger Maßnahme (Anpassung bzw. Eliminierung), Skalenreliabilität sowie Folgen für die Skalenanpassung.

Dimension	Item	Auffälligkeit		Maßnahme		Skalenreliabilität nach Maßnahme	Folge
		Schwierigkeit in %	Trennschärfe	Anpas.	Elim.		
Vorauss. Motivation	M1	81.48	-	-	-	.874	keine
	M4	88.89	-	nein	Ja		
Vorauss. Lernerfolg	LE_LT1	83.33	.162	-	-	.904	keine
	LE_LT4	92.59	-	ja	nein		
	LE_LT6	83.33	-	ja	nein		
	LE_LT7	-	-	nein	ja		
	LE_LT10	85.19	-	ja	nein		
	LE_LT17	-	-	nein	ja		

A.1.4 Exemplarische Antworten zu den offenen Fragen

Exemplarische Probandenaussage 1: „...definitiv unterstützend auf die Aufgabenbearbeitung zu chemischen Prozessen auf Stoff- und Teilchenebene, da sie es ja schon voneinander trennt...“

Exemplarische Probandenaussage 2: „Symbole/Texte/Bilder helfen den SuS die fachlichen Aspekte auf Modellebene zu verstehen...“ oder „Die chemischen Repräsentationsformen, v.a. die Kombination aus Text und Bild/Symbol, erleichterte das Beschreiben und Erklären.“

Exemplarische Probandenaussage 3: „...definitiv unterstützend auf die Aufgabenbearbeitung zu chemischen Prozessen auf Stoff- und Teilchenebene, da sie es ja schon voneinander trennt...“

Exemplarische Probandenaussage 4: „...Motivation durch relativ freie Bearbeitung und moderne Technik!...“ oder „Gerade durch das Umschalten der Darstellungsformen in der App wird die Auseinandersetzung mit den unterschiedlichen Repräsentationsformen unterstützt. Das wirkt sehr motivierend.“

Exemplarische Probandenaussage 5: „Wechsel zwischen den Repräsentationsebenen (Text Bild, Symbol) auf eigene Verantwortung /eigene Kontrolle - Kontrollmöglichkeit der eigenen Überlegungen - Visualisierung der Teilchenbewegung/ Prozesse auf Teilchenebene i.V.m. beobachtbaren Veränderungen.“).

Exemplarische Probandenaussage 6: „Die Navigation innerhalb der Lernpfade könnte niedrigschwelliger integriert sein...Auch die Einblendung der Aufgabenstellung über einen zusätzlichen Button etc. wäre sicherlich nicht schlecht.“ oder „...Allgemein fordert die App zu wenig auf, sich mit der Thematik tatsächlich zu beschäftigen (statt durchzuklicken).“

Exemplarische Probandenaussage 7: „...eine Aufgabe einbauen, in der die Spannung erhöht wird und gleichzeitig auch die Reaktionsgeschwindigkeit erhöht wird...“

Exemplarische Probandenaussage 8: „... Es kann die Fehlvorstellung vermitteln, dass sich die Ionen nur in Teilchen der Flüssigkeit befinden.“

Exemplarische Probandenaussage 9: „Ich fände einen Hinweis darauf gut, dass die Teilchen in Wirklichkeit viel zahlreicher und kleiner sind und sich viel schneller bewegen.“

Exemplarische Probandenaussage 10: „...eine Lupe, oder Zoom Funktion wäre toll, um genauer betrachten zu können was man sieht.“ oder „Inwieweit kann die App gestört werden, wenn die Kamera z. B. auf einen Mitschüler gerichtet wird?“

A.2 Hauptstudie 1

A.2.1 Material

A.2.1.1 Vorbefragung

Fragebogen

1 Herzlich Willkommen

Herzlich Willkommen zur Untersuchung der Wirksamkeit von Augmented Reality für den Chem

2 Einführung

Liebe*r Untersuchungsteilnehmer*in,

ich freue mich, dass Sie an der AR-Studie im Rahmen meines Promotionsprojekts teilnehmen möchten. Die Studie wird von der Professur für Fachdidaktik L Social Sciences & Technology unter der Leitung von mir, Melanie Ripsam, und Prof. Dr. Claudia Nerdel durchgeführt. Im Folgenden möchte ich Sie über die Studie informieren:

Studienziel

Das Ziel der Erhebung ist es, die **Wirksamkeit von Augmented Reality (AR)** zur **Förderung des Stoff-Teilchen-Konzeptverständnisses** und der **chemischen Fachlehrerfortbildung und -weiterbildung** zu untersuchen. Zu diesem Zwecke wurde eine **AR-Lernumgebung** zur Elektrolyse von Zinkiodid für den Chemieunterricht konzipiert. Sollen Ihre **Einstellungen und Selbstwirksamkeitserwartungen zu digitalen Medien und Augmented Reality** erhoben werden. Ferner möchte ich Ihren **Umgang mit der Fachsprache und Ihr Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis** erfassen. Um zudem Schwachstellen in der App aufzudecken, soll die **AR-Lernumgebung abschließend evaluiert und technisch bewertet (Usability)** werden.

Ablauf

Als aktive Chemielehrkraft testen Sie hierfür die AR-Lernumgebung im Labor oder an Ihrer Schule, beantworten vorher und nachher Aufgaben aus der Chemie per lauten Denken. Daher gliedert sich die AR-Studie in drei Teile:

- digitale Befragung zu Ihren Einstellungen und Selbstwirksamkeitserwartungen
- Präsenztreffen mit einer Befragung zum lauten Denken und der Testung im Labor oder an Ihrer Schule
- digitale Befragung hinsichtlich Ihrer persönlichen Einschätzung zur Tauglichkeit der App für den Chemieunterricht

Hinweis: Detaillierte Informationen zur Studiendurchführung im Labor oder an Ihrer Schule erfahren Sie von der Kursleitung vor Ort.

Kontakt (Projektleitungen)

Professur für Fachdidaktik Life Sciences der Technischen Universität München
TUM Department Educational Sciences (www.fds.edu.tum.de):

Melanie Ripsam

Wissenschaftliche Mitarbeiterin
Postanschrift: Arcisstr. 21, 80333 München
Besucheranschrift: Marsstr. 20, 80335 München
Raum 231
Tel.: 089 289 25105
melanie.ripsam@tum.de

und

Prof. Dr. rer. nat. Claudia Nerdel

Professorin für Biologiedidaktik
Studiendekanin Naturwissenschaftliche Bildung (LA Gym)
Postanschrift: Arcisstr. 21, 80333 München
Besucheranschrift: Marsstr. 20, 80335 München
Raum 234
Tel: 089 289 25377
claudia.nerdel@tum.de

3 Einwilligungserklärung

Teilnehmerinformation und Einwilligungserklärung

Bitte bestätigen Sie, bevor Sie die Umfrage starten, dass Sie die Teilnehmerinformation gelesen, die Einwilligungserklärung unterschrieben und zurück an Me

Die Teilnehmerinformation und Einwilligungserklärung haben Sie neben dem Befragungs-Link in einer e-Mail erhalten. Sollten Sie die Dokumente noch nicht erhalten haben, stehen Ihnen folgende Links zur Verfügung:

[Einwilligungserklärung](#) und [Teilnehmerinformation](#).
Haben Sie der Einwilligungserklärung zugestimmt?

Ich wurde schriftlich über die Studie und den Studienablauf aufgeklärt. Ich habe die Teilnehmerinformationen gelesen und verstanden. Ich bin mir bewusst, dass die Studie freiwillig ist und ich sie jederzeit und ohne Angabe von Gründen beenden kann. Mögliche Fragen konnten zu meiner Zufriedenheit beantwortet werden.

Wenn Sie mehr Information über die Verarbeitung Ihrer personenbezogenen Daten wünschen, bitte lesen Sie die Teilnehmerinformation (s.o. Link). Sollten Sie Fragen haben, wenden Sie sich an die Projektleitung Melanie Ripsam (s.o. e-Mail).

- ja
 nein

4.1 EE abgelehnt

Die Umfrage ist beendet!

Sie haben die Einwilligungserklärung nicht gelesen oder dieser nicht zugestimmt.
 Diese können Sie durch Klick auf den Link einsehen, um bei der Umfrage teilnehmen zu können.

Hinweis: Bitte löschen Sie die Cookies Ihres Browsers, wenn Sie die Umfrage zu einem späteren Zeitpunkt erneut beginnen möchten

Bei Fragen oder Schwierigkeiten wenden Sie sich bitte an die Projektleitung Melanie Ripsam
 (e-Mail: melanie.ripsam@tum.de oder Tel.: 0176 83 21 67 22)

5.1 EE zugestimmt

1. Digitale Befragung

Bevor Sie mit der Testung der AR-Lernumgebung im Labor oder an Ihrer Schule beginnen, füllen Sie bitte den digitalen Fragebogen auf den Facebook-Seite aus. Dabei gilt zu beachten:

Der Fragebogen wird ca. **15 Minuten** in Anspruch nehmen und besteht aus zwei Teilen:

- **Teil 1:** Zu Beginn erfolgt eine kurze Abfrage von **demografischen** und **organisatorischen Daten**.
- **Teil 2:** Hier werden Ihre Einstellungen und Selbstwirksamkeitserwartungen zu digitalen Medien und Innovationen wie Augmented Reality (AR) erfasst.

Es folgt - wenn noch nicht geschehen - anschließend die individuelle **Terminvereinbarung** für die **Testung der AR-Lernumgebung** (inkl. Bearbeitung der chemischen Experimente usw.). Wenden Sie sich daher bitte nach der Bearbeitung des Fragebogens an die Projektleitung.

Empfehlung: Vermeiden Sie Störungen, achten Sie auf eine ruhige Arbeitsatmosphäre und nehmen Sie sich ausreichend Zeit für die Bearbeitung des digitalen Fragebogens (inkl. beider Teile) ohne Unterbrechungen an einem Stück aus. Sollten Sie die Befragung trotzdem pausieren, können Sie den Fragebogen jederzeit fortsetzen.

Hinweis: Der gesamte Fragebogen enthält KEINE zurück-Buttons.

5.2 Code

Die Befragung erfolgt anonym. Dennoch ist es wichtig, dass wir die Antworten von der ersten Befragung der App (nach der App-Testung) zuordnen können. Es wird daher ein Code verwendet, der nur von Ihnen nachvollzogen werden kann.

Hinweise:

Ä, Ü etc. werden nicht in AE, UE etc. geändert, sondern bleiben Ä, Ü etc.

Bitte verwenden Sie Großbuchstaben.

Bitte tragen Sie den letzten Buchstaben Ihres (ersten) Vornamens ein (z.B. Max Mustermann = X):

Bitte tragen Sie die letzte Ziffer Ihres Geburtsjahres ein (z.B. 12. Januar 1996 = 6 oder 7. Juli 2000 = 0):

Bitte tragen Sie den zweiten Buchstaben Ihres Geburtsortes ein (z.B. Magdeburg = A):

Bitte tragen Sie den Tag Ihres Geburtsdatums als zweistellige Zahl ein (z.B. 12. Januar 1997 = 12 oder 6. Juli 2003 = 06):

Bitte tragen Sie den ersten Buchstaben des (ersten) Vornamens Ihrer Mutter ein (z.B. Sarah Mustermann = S):

Bitte tragen Sie den letzten Buchstaben des (ersten) Vornamens Ihrer Mutter ein (z.B. Sarah Mustermann = H):

Bitte tragen Sie den Tag des Geburtsdatums Ihrer Mutter als zweistellige Zahl ein (z.B. 17. Juli 1965 = 17 oder 09. August 1959 = 09):

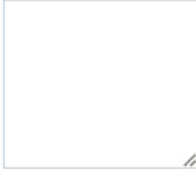
6 Teil 1

TEIL 1

Demografische und organisatorische Daten**7 9.1. Definitionen**

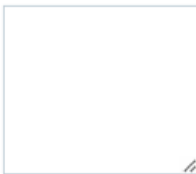
Bitte definieren Sie, was Sie persönlich unter digitalen Medien verstehen.

Ihnen stehen max. 500 Zeichen zur Verfügung.

**8 9.1. Definitionen 1**

Bitte definieren Sie, was Sie persönlich unter Augmented Reality verstehen.

Ihnen stehen max. 500 Zeichen zur Verfügung.

**9 9.2. Demografische und organisatorische Daten: Geschlecht**

Bitte geben Sie Ihr Geschlecht an.

- männlich
- weiblich
- divers
- keine Angabe

10 9.2. Demografische und organisatorische Daten 1: Alter

Wie alt sind Sie?

Bitte nur eine Antwort auswählen.

- jünger als 25 Jahre
- 25 - 30 Jahre
- 31 - 40 Jahre
- 41 - 50 Jahre
- 51 - 60 Jahre
- älter als 60 Jahre

11 9.2. Demografische und organisatorische Daten 2: Tätigkeit an Schule oder Universität

Sind Sie als Lehrperson an einer Schule tätig?

Bitte nur eine Antwort auswählen.

- ja, ich bin Lehrkraft an einer Schule
- nein, ich bin keine Lehrperson
- nein, ich bin Lehrperson an einer Universität

11.1.1 Bundesland

In welchem Bundesland in Deutschland unterrichten Sie?

Bitte wählen Sie eine Antwortoption aus.

11.1.2 Filter

An welcher Schulart unterrichten Sie?

Bitte nur eine Antwort auswählen.

- Gymnasium
- Realschule
- FOS
- BOS
- andere (bitte angeben):

11.1.3 Filter

Hat Ihre Schule ein besonderes Schulprofil (Bsp.: Inklusion, Digitalisierung usw.)?

Bitte eine Antwort auswählen. Sie können in dem Textfeld auch mehrere Aspekte aufzählen.

- nein
- ja (bitte angeben):

11.2.1 Bundesland

In welchem Bundesland in Deutschland lehren Sie?

Bitte wählen Sie eine Antwortoption aus.

11.2.2 Filter

Hat Ihr Arbeitskreis ein besonderes Profil (Bsp.: Inklusion, Digitalisierung usw.)?

Bitte eine Antwort auswählen. Sie können in dem Textfeld auch mehrere Aspekte aufzählen.

- nein
- ja (bitte angeben):

11.3.1 Filter

Nennen Sie die Fächer, die Sie hauptsächlich an Ihrer Schule unterrichten.

Wählen Sie nur diejenigen Fächer aus, in denen Sie mindestens drei Unterrichtsstunden pro Woche unterrichten.

- Biologie
- Chemie
- Physik
- Informatik
- Mathematik

andere (Fremdsprache, Kunst, Sport, usw.)

11.3.2 ... Filter

Seit wie vielen Jahren unterrichten Sie schon an Schulen (das Referendariat eingerechnet)?

Bitte nur eine Antwort auswählen.

- weniger als 1 Jahr
 1-3 Jahre
 4-5 Jahre
 6-9 Jahre
 10-14 Jahre
 15-19 Jahre
 20 Jahre oder mehr

11.3.3 ... Filter

In welchen Klassenstufen unterrichten Sie derzeit das Fach Chemie (auch NUT)?

Bitte Zutreffendes ankreuzen. Eine Mehrfachauswahl ist möglich.

- Klassenstufe 5
 Klassenstufe 6
 Klassenstufe 7
 Klassenstufe 8
 Klassenstufe 9
 Klassenstufe 10
 Klassenstufe 11
 Klassenstufe 12
 Klassenstufe 13

11.3.4 ... Filter

Wie viele Klassen unterrichten Sie aktuell im Fach Chemie?

Bitte fügen Sie eine Nummer ein.

11.4.1 ... Filter

Nennen Sie die Fächer, die Sie schwerpunktmäßig an Ihrer Universität lehren.

Wählen Sie nur diejenigen Fächer aus, in denen Sie mindestens drei Semesterwochenstunden pro Woche lehren.

- Biologie
 Chemie
 Physik
 Informatik
 Mathematik
 andere

11.4.2 ... Filter

Seit wie vielen Jahren lehren Sie schon an einer Universität?

Bitte nur eine Antwort auswählen.

- weniger als 1 Jahr
 1-3 Jahre
 4-5 Jahre
 6-9 Jahre
 10-14 Jahre
 15-19 Jahre
 20 Jahre oder mehr

11.4.3 ... Filter

Wie viele Kurse lehren Sie aktuell im Fach Chemie?

Bitte fügen Sie eine Nummer ein.

11.5.1 Filter

Wie oft thematisieren Sie in Ihrem Chemieunterricht explizit die chemische Fachsprache über alle Klassen hinweg?

Bitte nur eine Antwort auswählen.

- nie
- 1-3 Mal pro Schuljahr
- 1-3 Mal pro Halbjahr
- 1-3 Mal pro Monat
- 1-3 Mal pro Woche
- 5-6 Mal pro Woche
- Jede Unterrichtsstunde

11.5.2 Filter

Wie oft thematisieren Sie in Ihrem Chemieunterricht explizit den Wechsel von Stoff- auf Teilchenebene über alle Klassen hinweg?

Bitte nur eine Antwort auswählen.

- nie
- 1-3 Mal pro Schuljahr
- 1-3 Mal pro Halbjahr
- 1-3 Mal pro Monat
- 1-3 Mal pro Woche
- 5-6 Mal pro Woche
- Jede Unterrichtsstunde

11.5.3 Filter

Wie oft thematisieren Sie in Ihrem Chemieunterricht explizit das chemische Modellieren über alle Klassen hinweg?

Bitte nur eine Antwort auswählen.

- nie
- 1-3 Mal pro Schuljahr
- 1-3 Mal pro Halbjahr
- 1-3 Mal pro Monat
- 1-3 Mal pro Woche
- 5-6 Mal pro Woche
- Jede Unterrichtsstunde

11.6.1 Filter

Wie oft thematisieren Sie in Ihren Lehrveranstaltungen explizit die chemische Fachsprache über alle Kurse hinweg?

Bitte nur eine Antwort auswählen.

- nie
- 1-3 Mal pro Schuljahr
- 1-3 Mal pro Halbjahr
- 1-3 Mal pro Monat
- 1-3 Mal pro Woche
- 5-6 Mal pro Woche
- Jede Unterrichtsstunde

11.6.2 Filter

Wie oft thematisieren Sie in Ihren Lehrveranstaltungen explizit den Wechsel von Stoff- auf Teilchenebene über alle Kurse hinweg?

Bitte nur eine Antwort auswählen.

- nie
- 1-3 Mal pro Schuljahr
- 1-3 Mal pro Halbjahr
- 1-3 Mal pro Monat
- 1-3 Mal pro Woche
- 5-6 Mal pro Woche
- Jede Unterrichtsstunde

11.6.3 Filter

Wie oft thematisieren Sie in Ihren Lehrveranstaltungen explizit das chemische Modellieren über alle Kurse hinweg?

Bitte nur eine Antwort auswählen.

- nie
- 1-3 Mal pro Schuljahr
- 1-3 Mal pro Halbjahr
- 1-3 Mal pro Monat
- 1-3 Mal pro Woche
- 5-6 Mal pro Woche
- Jede Unterrichtsstunde

11.7.1 Filter

Nutzen Sie digitale Medien in Ihrem Chemieunterricht?

Bitte wählen Sie eine Antwort aus.

- ja
- nein

11.8.1 Filter

Nutzen Sie digitale Medien in Ihren Lehrveranstaltungen?

Bitte wählen Sie eine Antwort aus.

- ja
- nein

11.9.1 Filter

Seit wie vielen Jahren setzen Sie digitale Medien in Ihrem Chemieunterricht ein?

Bitte eine Antwort auswählen.

- Ich habe noch keine digitalen Medien im Chemieunterricht eingesetzt
- weniger als 1 Jahr
- 1-3 Jahre
- 4-5 Jahre
- 6-9 Jahre
- 10-14 Jahre
- 15-19 Jahre
- 20 oder mehr Jahre
- möchte ich nicht angeben

11.9.2 Filter

Welche digitalen Werkzeuge haben Sie oder Ihre Schüler*innen im Chemieunterricht bereits eingesetzt?

Mehrere Antwortmöglichkeiten sind möglich.

- Präsentationen
- Digitale Poster und Pinnwände
- Videos/Audios anschauen
- Blogs
- Videos/Audios erstellen
- Ich habe noch keine digitalen Werkzeuge im Chemieunterricht eingesetzt
- Online-Lernumgebungen
- Online-Quize und Umfragen
- Interaktive Übungen und Apps
- Sonstiges (bitte angeben):
- Möchte ich nicht angeben

11.10.1 Filter

Seit wie vielen Jahren setzen Sie digitale Medien in Ihren Lehrveranstaltungen ein?

Bitte eine Antwort auswählen.

- Ich habe noch keine digitalen Medien im Chemieunterricht eingesetzt
- weniger als 1 Jahr
- 1-3 Jahre
- 4-5 Jahre
- 6-9 Jahre
- 10-14 Jahre
- 15-19 Jahre
- 20 oder mehr Jahre
- möchte ich nicht angeben

11.10.2 Filter

Welche digitalen Werkzeuge haben Sie oder Ihre Student*innen in Ihren Lehrveranstaltungen bereits eingesetzt?

Mehrere Antwortmöglichkeiten sind möglich.

- Präsentationen
- Digitale Poster und Pinnwände
- Videos/Audios anschauen
- Blogs
- Videos/Audios erstellen
- Ich habe noch keine digitalen Werkzeuge im Chemieunterricht eingesetzt
- Online-Lernumgebungen
- Online-Quizzes und Umfragen
- Interaktive Übungen und Apps
- Sonstiges (bitte angeben):
- Möchte ich nicht angeben

11.11.1 Filter

Haben Sie an Ihrer Schule bereits mit Augmented Reality gearbeitet?

Bitte eine Antwort auswählen.

- ja
- nein

11.12.1 Filter

Haben Sie an Ihrer Universität bereits mit Augmented Reality gearbeitet?

Bitte eine Antwort auswählen.

- ja
- nein

11.13.1 Filter

Für welche chemischen Unterrichtsinhalte nutzen Sie digitale Medien? Nennen Sie auch das Medium selbst.

Bsp.: Schülerexperimente (Säure-Base-Reaktionen): Erstellung von Experimentiervideos mit dem iPad

11.13.2 Filter

Nutzen Sie digitale Medien in Ihrem Chemieunterricht für einen der genannten Schwerpunkte *Chemische Fachsprache, Stoff-Teilchen-Ebene Modellieren*?

Bitte wählen Sie für jeden Themenschwerpunkt eine Antwort aus.

	ja	nein
Chemische Fachsprache	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Stoff-Teilchen-Ebenenwechsel	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Chemisches Modellieren	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

11.13.2.1.1 Chemische Fachsprache

Für welche chemischen Inhalte im Zusammenhang mit der chemischen Fachsprache nutzen Sie digitale Medien? Nennen Sie die Medien sowie bestimmen Sie das chemische Themengebiet (bspw. iPads; eBooks; Neutralisationsreaktion).

Eine Mehrfachauswahl ist möglich.

- Digitale Medien
- Digitale Werkzeuge
- Themengebiete

11.13.2.2.1 S-T-EW

Für welche chemischen Inhalte im Zusammenhang mit dem Stoff-Teilchen-Ebenenwechsel nutzen Sie digitale Medien? Nennen Sie die Medien und bestimmen Sie das chemische Themengebiet (bspw. iPads; interaktive Arbeitsblätter, Aufbau des PSE).

Eine Mehrfachauswahl ist möglich.

- Digitale Medien
- Digitale Werkzeuge
- Themengebiete

11.13.2.3.1 Chemische Modellieren

Für welche chemischen Inhalte im Zusammenhang mit dem chemischen Modellieren nutzen Sie digitale Medien? Nennen Sie die Medien sowie bestimmen Sie das chemische Themengebiet (bspw. iPads; Videos; Kristallstrukturen).

Eine Mehrfachauswahl ist möglich.

- Digitale Medien
- Digitale Werkzeuge
- Themengebiete

11.14.1 Filter

Für welche chemischen Kursinhalte nutzen Sie digitale Medien? Nennen Sie auch das Medium selbst.

Bsp.: Schülerexperimente (Säure-Base-Reaktionen): Erstellung von Experimentiervideos mit dem iPad

11.14.2 Filter

Nutzen Sie digitale Medien in Ihren Lehrveranstaltungen für einen der genannten Schwerpunkte *Chemische Fachsprache, Stoff-Teilchen-Ebene Modellieren*?

Bitte wählen Sie für jeden Themenschwerpunkt eine Antwort aus.

	ja	nein
Chemische Fachsprache	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Stoff-Teilchen-Ebenenwechsel	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Chemisches Modellieren	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

11.14.2.1.1 Chemische Fachsprache

Für welche chemischen Inhalte im Zusammenhang mit der chemischen Fachsprache nutzen Sie digitale Medien? Nennen Sie die Medien sowie bestimmen Sie das chemische Themengebiet (bspw. iPads; eBooks; Neutralisationsreaktion).

Eine Mehrfachauswahl ist möglich.

- Digitale Medien
- Digitale Werkzeuge
- Themengebiete

11.14.2.2.1 S-T-EW

Für welche chemischen Inhalte im Zusammenhang mit dem Stoff-Teilchen-Ebenenwechsel nutzen Sie digitale Medien? Nennen Sie die Medien und bestimmen Sie das chemische Themengebiet (bspw. iPads; interaktive Arbeitsblätter, Aufbau des PSE).

Eine Mehrfachauswahl ist möglich.

- Digitale Medien
- Digitale Werkzeuge
- Themengebiete

11.14.2.3.1 Chemische Modellieren

Für welche chemischen Inhalte im Zusammenhang mit dem chemischen Modellieren nutzen Sie digitale Medien? Nennen Sie die Medien sowie bestimmen Sie das chemische Themengebiet (bspw. iPads; Videos; Kristallstrukturen).

Eine Mehrfachauswahl ist möglich.

- Digitale Medien
- Digitale Werkzeuge
- Themengebiete

12 9.2. Demografische und organisatorische Daten 5: Studium

Welches Studium haben Sie absolviert?

- Lehramt
- Sonstiges (Bitte angeben):

12.1.1 Lehramtsstudium

Nennen Sie das Lehramt, das Sie studiert haben.

Bitte zutreffendes ankreuzen. Eine Mehrfachauswahl ist möglich.

- Schulart (bitte angeben):
- Fächerkombination (bitte angeben):
- ggf. Erweiterungsfach 1 (bitte angeben):

ggf. Erweiterungsfach 2 (bitte angeben):

Sonstiges (bitte angeben):

12.1.2 ... Lehramtsstudium

Haben Sie ein Referendariat absolviert oder befinden Sie sich noch in diesem?

Bitte nur eine Antwort auswählen.

- Ja, ich habe ein Referendariat absolviert.
 Nein, ich habe kein Referendariat absolviert.
 Ich befinde mich noch im Referendariat.

13 9.2. Demografische und organisatorische Daten 6: Digitalisierung und Studium

Haben Sie bereits im Studium das Thema Digitalisierung behandelt?

Bitte eine Antwort auswählen.

- ja
 nein

13.1.1 ... Digitalisierung im Studium

Nennen Sie die Themenbereiche, für welche digitale Medien in Ihrem Studium eingesetzt wurden.

13.2.1 ... Digitalisierung im Studium

Haben Sie bereits im Studium Augmented Reality behandelt?

Bitte eine Antwort auswählen.

- ja
 nein

13.2.1.1.1 ... AR im Studium

Nennen Sie die Themen, für welche AR in Ihrem Studium eingesetzt wurde.

14 9.2. Demografische und organisatorische Daten 7: Fortbildung

Haben Sie bereits Fortbildungen zum Thema Digitalisierung besucht?

Bitte eine Antwort auswählen.

- ja
 nein

14.1.1 ... Fortbildungen Digitale Medien

Nennen Sie die Anzahl und Themeninhalte der besuchten Fortbildungen zu digitalen Medien.

Anzahl (bitte angeben):

Art der Fortbildungen bzw. Themenschwerpunkt (bitte angeben):

14.1.2 ... Fortbildung Digitalisierung besucht

Haben Sie bereits Fortbildungen zum Thema Augmented Reality besucht?

Bitte eine Antwort auswählen.

- ja
 nein

14.2.1 ... Fortbildung AR Themen

Nennen Sie die Anzahl und die Themeninhalte bzw. Art der besuchten AR-Fortbildungen

- Anzahl (bitte angeben):
- Art der AR-Fortbildung bzw. Themeninhalte (bitte angeben):

15 9.2. Demografische und organisatorische Daten 7: Privat

Nutzen Sie privat digitale Medien?

Bitte eine Antwort auswählen.

- ja
 nein

15.1.1 ... Privat Digitale Medien

Nennen Sie die Anzahl der Verwendungen (bspw. regelmäßig, gelegentlich, ab und zu usw.) und die Themeninhalte, für die Sie digitale Medien Youtube Videos, Social Media usw.),

Eine Mehrfachauswahl ist möglich (Sie können bis zu vier Themenbereiche nennen).

- Anzahl der Verwendungen (bitte angeben):
- Private Verwendung von Digitalen Medien für (bitte angeben):
- Private Verwendung von Digitalen Medien für (bitte angeben):
- Private Verwendung von Digitalen Medien für (bitte angeben):
- Private Verwendung von Digitalen Medien für (bitte angeben):

16 9.2. Demografische und organisatorische Daten 7: Privat

Nutzen Sie privat Augmented Reality?

Bitte eine Antwort auswählen.

- ja
 nein

16.1.1 ... AR Privat Art und Themen

Nennen Sie die Anzahl Ihrer Verwendungen (bspw. regelmäßig, gelegentlich, ab und zu usw.) und die Themeninhalte (bspw. Online Shopping Sie AR privat nutzen.

Eine Mehrfachauswahl ist möglich (Sie können bis zu vier Themenbereiche nennen).

- Anzahl der Verwendungen (bitte angeben):
- Private Verwendung von AR für (bitte angeben):
- Private Verwendung von AR für (bitte angeben):
- Private Verwendung von AR für (bitte angeben):
- Private Verwendung von AR für (bitte angeben):

17 zu Teil 2

Sie haben den ersten Teil des Fragebogens erfolgreich ausgefüllt.

18 Teil 2

TEIL 2

Einstellungen und Selbstwirksamkeitserwartungen zu digitalen Medien und Augmented Reality

19 Einstellungen und Selbstwirksamkeit

Einstellungen und Selbstwirksamkeitserwartungen zu digitalen Medien und Augmented Reality

- Nun erfolgt die Befragung zu Ihren Einstellungen und Selbstwirksamkeitserwartungen hinsichtlich digitaler Medien und Augmented Reality im Chemieunterricht.
- Einstellungen zielen auf Ihre individuellen Bewertung(en) und Selbstwirksamkeitserwartungen auf Ihre subjektiv wahrgenommenen und voraussichtlichen soll stets vor dem Hintergrund des mehrwertbringenden Einsatzes digitaler Medien und Innovationen wie Augmented Reality im Chemieunterricht (CU) ge
- Es ist Ihre Expertise als Chemiedidaktiker gefragt. Dementsprechend sind in den Items Anwendungen digitaler Medien und Werkzeuge für das Fach Chemie vierstufige Likertskalen realisiert (1=trifft gar nicht zu, 2=trifft weniger zu, 3=trifft weitgehend zu, 4=trifft vollkommen zu). Durch Ankreuzen eines der Kn zu einem der Gegensatzpaare und ihren Abstufungen äußern.
- Entscheiden Sie möglichst spontan, sodass Ihre unmittelbare Einschätzung zum Tragen kommt. Bitte kreuzen Sie immer eine Antwort an, auch wenn Sie bei Begriffspaare unsicher sind.

20 Einstellungen

EINSTELLUNGEN

21 Einstellungen zu digitalen Medien

Einstellungen zu digitalen Medien

Welche der angeführten Aussagen zu digitalen Medien im Chemieunterricht (CU) treffen hinsichtlich Ihrer persönlichen Einschätzung am ehesten zu?

Bitte wählen Sie stets eine Antwort aus.

	trifft gar nicht zu	trifft weniger zu	trifft weitgehend zu	trifft vollkommen zu
Der Einsatz digitaler Medien ermöglicht in hohem Maße selbstbestimmtes Lernen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Durch den Einsatz digitaler Medien können Schüler*innen besser zum Lernen im Fach Chemie motiviert werden.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Digitale Medien eröffnen Spielräume für Kreativität beim Lernen chemischer Inhalte.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Der Einsatz von digitalen Medien in der Schule sorgt dafür, dass Lernende gut auf das Berufsleben vorbereitet werden.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Das Lernen mit digitalen Medien ist eine effiziente Form des Lernens im Fach Chemie.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Mit digitalen Medien kann ich CU adressatengerechter planen und anpassen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Digitale Medien erlauben eine höhere Schüleraktivierung.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Für mich sind digitale Medien ein nützliches Arbeitsmittel zur Förderung des Stoff-Teilchen-Konzeptverständnisses im CU.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Für mich sind digitale Medien ein nützliches Arbeitsmittel zur Förderung der chemischen Fachsprache im CU.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Für mich sind digitale Medien ein sehr nützliches Arbeitsmittel zur Darstellung verschiedener Repräsentationsformen auf Stoff- und Teilchenebene.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Für mich sind digitale Medien ein nützliches Arbeitsmittel um vorwissenschaftliche Vorstellungen von Schüler*innen im CU zu thematisieren und Fehlvorstellungen gegebenenfalls zu beseitigen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Der Einsatz neuer Technologien im CU kann das kollaborative Arbeiten der Schüler*innen fördern.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Der Einsatz digitaler Medien im CU kann das kooperative Arbeiten der Schüler*innen fördern.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Der Einsatz digitaler Medien im CU kann das selbstregulierte Lernen der Schüler*innen fördern.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Der Einsatz digitaler Medien kann die Fähigkeiten beim Experimentieren im CU fördern.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich würde es begrüßen, wenn digitale Medien häufiger für Lehr- und Lernzwecke genutzt würden.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich finde die Auseinandersetzung mit digitalen Medien spannend.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich kann mir das Arbeiten ohne digitale Medien kaum noch vorstellen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

22 Einstellungen zu AR

Einstellungen zu Innovationen wie Augmented Reality

Welche der angeführten Aussagen zu technischen Innovationen wie Augmented Reality (AR) im Chemieunterricht (CU) treffen hinsichtlich Ihrer persönlichen E

Bitte wählen Sie stets eine Antwort aus.

	trifft gar nicht zu	trifft weniger zu	trifft weitgehend zu	trifft vollkommen zu
Innovationen wie Augmented Reality sollten generell in den Fachlehrplänen der Schulen ein starkes Gewicht erhalten.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Der Einsatz von Innovationen wie Augmented Reality ermöglicht	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

(voraussichtlich) in hohem Maße selbstbestimmtes Lernen.				
Durch den Einsatz von Innovationen wie Augmented Reality können Schüler*innen (voraussichtlich) besser zum Lernen im Fach Chemie motiviert werden.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Innovationen wie Augmented Reality eröffnen (voraussichtlich) Spielräume für Kreativität beim Lernen chemischer Inhalte.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Der Einsatz von Innovationen wie Augmented Reality in der Schule sorgt dafür, dass Lernende gut auf das Berufsleben vorbereitet werden.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Das Lernen mit Innovationen wie Augmented Reality ist (voraussichtlich) eine effiziente Form des Lernens im Fach Chemie.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Mit Innovationen wie Augmented Reality kann ich CU adressatengerechter planen und anpassen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Innovationen wie Augmented Reality erlauben (voraussichtlich) eine höhere Schüleraktivierung.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Für mich sind Innovationen wie Augmented Reality ein nützliches Arbeitsmittel zur Förderung des Stoff-Teilchen-Konzeptverständnisses von Schüler*innen im CU.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Für mich sind Innovationen wie Augmented Reality ein nützliches Arbeitsmittel zur Förderung der chemischen Fachsprache im CU.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Für mich sind Innovationen wie Augmented Reality ein nützliches Arbeitsmittel zur Darstellung verschiedener Repräsentationsformen auf Stoff- und Teilchenebene.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Für mich sind Innovationen wie Augmented Reality ein nützliches Arbeitsmittel, um vorwissenschaftliche Vorstellungen von Schüler*innen im CU zu thematisieren und Fehlvorstellungen gegebenenfalls zu beseitigen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Der Einsatz von Innovationen wie Augmented Reality im CU kann das kollaborative Arbeiten der Schüler*innen fördern.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Der Einsatz von Innovationen wie Augmented Reality im CU kann das kooperative Arbeiten der Schüler*innen fördern.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Der Einsatz von Innovationen wie Augmented Reality im CU kann das selbstregulierte Lernen der Schüler*innen fördern.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Der Einsatz von Innovationen wie Augmented Reality kann die Fähigkeiten beim Experimentieren im CU fördern.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich würde es begrüßen, wenn Innovationen wie Augmented Reality häufiger für Lehr- und Lernzwecke genutzt würden.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich finde die Auseinandersetzung mit Innovationen wie Augmented Reality spannend.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich würde gerne mehr über die unterschiedlichen Einsatzmöglichkeiten von Innovationen wie Augmented Reality im CU wissen, als ich jetzt weiß.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich probiere gerne neue innovative, technische Anwendungen aus.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

23 Selbstwirksamkeit

SELBSTWIRKSAMKEIT

24 Selbstwirksamkeit zu digitalen Medien

Selbstwirksamkeitserwartungen zu digitalen Medien

Welche der angeführten Aussagen zum Umgang mit digitalen Medien im Chemieunterricht (CU) trifft hinsichtlich Ihrer persönlichen Einschätzung am ehesten a

Bitte wählen Sie stets eine Antwort aus.

	trifft gar nicht zu	trifft weniger zu	trifft weitgehend zu	trifft vollkommen zu
Ich komme gut damit zurecht neue digitale Materialien wie Lernvideos oder Animationen für meinen CU zu erstellen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich finde es leicht, Schüler*innen zu erklären, wie digitale Medien zu bedienen sind.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich selbst kann digitale Medien sinnvoll im CU einsetzen, um Feedback von den Schüler*innen zu erhalten.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Im CU ein Phänomen oder einen Prozess mithilfe digitaler Medien zu modellieren fällt mir leicht.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich bin grundsätzlich in der Lage digitale Medien zielgerichtet im CU einzusetzen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich selbst kann digitale Medien sinnvoll im CU einsetzen, um das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis von Schüler*innen zu fördern.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich weiß worauf ich achten muss, wenn ich mithilfe digitaler Medien die fachsprachliche Kompetenz der Schüler*innen im CU fördern möchte.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich weiß worauf ich achten muss, wenn ich digitale Medien einsetze, um nicht sichtbare chemische Prozesse auf Teilchenebene mithilfe von Repräsentationsformen zu visualisieren.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Es fällt mir leicht, digitale Medien zum Zwecke der Motivationssteigerung im CU einzusetzen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich kann digitale Medien zur Förderung des selbstregulierten Lernens im CU einsetzen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich kann digitale Medien zur Förderung des kooperativen Arbeitens im CU einsetzen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich kann digitale Medien zur Förderung des kollaborativen Arbeitens im CU einsetzen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich weiß wie ich vorgehen muss, um mithilfe digitaler Medien vorwissenschaftliche Vorstellungen von Schüler*innen im CU zu thematisieren und Fehlvorstellungen gegebenenfalls zu beseitigen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Bei auftretenden technischen Schwierigkeiten benötige ich meist keine Hilfe von anderen Leuten.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Im technischen Umgang mit digitalen Medien und ihren verschiedenen Softwareprogrammen fühle ich mich sicher.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

25 Selbstwirksamkeit zu AR

Selbstwirksamkeitserwartungen zu Innovationen wie Augmented Reality

Welche der angeführten Aussagen zum Umgang mit technischen Innovationen wie Augmented Reality (AR) im Chemieunterricht (CU) trifft hinsichtlich Ihrer persönlichen Einstellung auf Sie zu?

Bitte wählen Sie stets eine Antwort aus.

	trifft gar nicht zu	trifft weniger zu	trifft weitgehend zu	trifft vollkommen zu
Ich komme gut damit zurecht Lernumgebungen mit Innovationen wie Augmented Reality für meinen CU zu erstellen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich finde es leicht, Schüler*innen zu erklären, wie Innovationen wie Augmented Reality zu bedienen sind.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich selbst kann Innovationen wie Augmented Reality sinnvoll im CU einsetzen, um Feedback von den Schüler*innen zu erhalten.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Im CU ein Phänomen oder einen Prozess mithilfe Innovationen wie Augmented Reality zu modellieren fällt mir leicht.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich bin grundsätzlich in der Lage Innovationen wie Augmented Reality zielgerichtet im CU einzusetzen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich selbst kann Innovationen wie Augmented Reality sinnvoll im CU einsetzen, um das Stoff-Teilchen-	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Konzeptverständnis bei Schüler*innen zu fördern.

Ich weiß worauf ich achten muss, wenn ich mithilfe von Innovationen wie Augmented Reality die fachsprachliche Kompetenz der Schüler*innen im CU fördern möchte.

Ich weiß worauf ich achten muss, wenn ich Innovationen wie Augmented Reality einsetze, um nicht sichtbare chemische Prozesse auf Teilchenebene mithilfe von Repräsentationsformen zu visualisieren.

Es fällt mir leicht, Innovationen wie Augmented Reality zum Zwecke der Motivationssteigerung im CU einzusetzen.

Ich kann Innovationen wie Augmented Reality zur Förderung des selbstregulierten Lernens im CU einsetzen.

Ich kann Innovationen wie Augmented Reality zur Förderung des kooperativen Arbeitens im CU einsetzen.

Ich kann Innovationen wie Augmented Reality zur Förderung des kollaborativen Arbeitens im CU einsetzen.

Ich weiß, wie ich vorgehen muss, um mithilfe von Innovationen wie Augmented Reality vorwissenschaftliche Vorstellungen von Schüler*innen im CU zu thematisieren und Fehlvorstellungen gegebenenfalls zu beseitigen.

26 Endseite

Vielen Dank, dass Sie sich die Zeit genommen haben an der Befragung teilzunehmen.

Ritte vereinbaren Sie nun mit der Projektleitung Melanie Rincam (eMail: melanie.rincam@tum.de oder Tel: 0176 83 21 67 22) einen Termin für die Testung der AR-Umgebung im Labor oder Ihrer Schule sowie, falls gewünscht, für die Befragung. Auch für Rückfragen steht Ihnen die Projektleitung jederzeit zur Verfügung.

A.2.1.2 Nachbefragung

Fragebogen**1 Herzlich Willkommen****Herzlich Willkommen zur Untersuchung der Wirksamkeit von Augmented Reality für den Chem****2 Einführung****Liebe*r Untersuchungsteilnehmer*in,**

ich freue mich, dass Sie an der AR-Studie im Rahmen meines Promotionsprojekts teilnehmen möchten. Die Studie wird von der Professur für Fachdidaktik L Social Sciences & Technology unter der Leitung von mir, Melanie Ripsam, und Prof. Dr. Claudia Nerdel durchgeführt. Im Folgenden möchte ich Sie über die 2 informieren:

Studienziel

Das Ziel der Erhebung ist es, die **Wirksamkeit von Augmented Reality (AR)** zur **Förderung des Stoff-Teilchen-Konzeptverständnisses** und der **chemischen Fa** Lehrerfortbildung und -weiterbildung zu untersuchen. Zu diesem Zwecke wurde eine **AR-Lernumgebung** zur Elektrolyse von Zinkiodid für den Chemieunterricht konzipi sollen Ihre **Einstellungen und Selbstwirksamkeitserwartungen zu digitalen Medien und Augmented Reality** erhoben werden. Ferner möchte ich Ihren **Umgang Fachsprache und Ihr Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis** erfassen. Um zudem Schwachstellen in der App aufzudecken, soll die **AR-Lernumgebung** abschließend **1 sowie technisch bewertet (Usability)** werden.

Ablauf

Als aktive Chemielehrkraft testen Sie hierfür die AR-Lernumgebung im Labor oder an Ihrer Schule, beantworten vorher und nachher Aufgaben aus der Chemie per lauten persönliche Meinung zur Konzeptionierung der App ab. Daher gliedert sich die AR-Studie in drei Teile:

- digitale Befragung zu Ihren Einstellungen und Selbstwirksamkeitserwartungen
- Präsenztreffen mit einer Befragung zum lauten Denken und der Testung im Labor oder an Ihrer Schule
- digitale Befragung hinsichtlich Ihrer persönlichen Einschätzung zur Tauglichkeit der App für den Chemieunterricht

Hinweis: Detaillierte Informationen zur Studiendurchführung im Labor oder an Ihrer Schule erfahren Sie von der Kursleitung vor Ort.

Kontakt (Projektleitungen)

Professur für Fachdidaktik Life Sciences der Technischen Universität München
TUM Department Educational Sciences (www.fds.edu.tum.de):

Melanie Ripsam

Wissenschaftliche Mitarbeiterin
Postanschrift: Arcisstr. 21, 80333 München
Besucheranschrift: Marsstr. 20, 80335 München
Raum 231
Tel.: 089 289 25105
melanie.ripsam@tum.de

und

Prof. Dr. rer. nat. Claudia Nerdel

Professorin für Biologiedidaktik
Studiendekanin Naturwissenschaftliche Bildung (LA Gym)
Postanschrift: Arcisstr. 21, 80333 München
Besucheranschrift: Marsstr. 20, 80335 München
Raum 234
Tel: 089 289 25377
claudia.nerdel@tum.de

3 Schritte 1 und 2 erledigt**Studienteilnahmeverlauf**

Bitte bestätigen Sie, bevor Sie die Umfrage starten, dass Sie an der 1. digitalen Befragung und der Testung der AR-Lernumgebung im Labor oder an Ihrer Sc teilgenommen haben.

Haben Sie an der 1. Befragung teilgenommen, die Fragen per lautem Denken beantwortet, die AR-Lernumgebung getestet und möchten nun (Usability-Testung) teilnehmen?

- Ja, ich habe den 1. Fragebogen ausgefüllt, die AR-App getestet und möchte nun mit dem Usability-Test beginnen.
- Nein, ich habe nicht den 1. Fragebogen ausgefüllt oder die AR-App getestet und möchte nun die Studie beenden.

4.1 Schritte 1 und 2 NICHT erledigt

Die Umfrage ist beendet!

Sie haben entweder an der 1. digitalen Befragung bzw. der App-Testung nicht teilgenommen oder möchten die Teilnahme aus anderen Gründen beenden (s. Einwilligungserklärung).

Hinweis: Bitte löschen Sie die Cookies Ihres Browsers, wenn Sie die Umfrage zu einem späteren Zeitpunkt erneut beginnen möchten

Bei Fragen oder Schwierigkeiten wenden Sie sich bitte an die Projektleitung Melanie Ripsam
(e-Mail: melanie.ripsam@tum.de oder Tel.: 0176 83 21 67 22)

5.1 Schritt 1 und 2 erledigt**2. Digitale Befragung**

Nachdem Sie die Testung der AR-Lernumgebung abgeschlossen haben, füllen Sie bitte den Fragebogen auf den folgenden Seiten vollständig aus. Der Fragebogen wurde zur Beurteilung der AR-Lernumgebung formuliert. Die Gesamtheit aller Items und offenen Fragen ist auf eine Befragungszeit von ca. 10 Minuten zu bewältigen. Der Fragebogen besteht aus zwei Teilen:

- **Teil 1:** Zu Beginn erfolgt ein Akzeptanz- und Usabilitytest hinsichtlich der Tauglichkeit der AR-Lernumgebung für den Chemieunterricht (CU).
- **Teil 2:** Hier werden Ihnen, in Ergänzung zu Teil 1, offene Fragen gestellt, mit welchen Sie die AR-Lernumgebung selbstständig bewerten und kommentieren können.

Wenden Sie sich bitte anschließend - nach vollständiger Bearbeitung - an die Projektleitung. Diese händigt Ihnen - falls noch nicht geschehen - die chemische Denker aus.

Empfehlung: Vermeiden Sie Störungen, minimieren Sie Geräuschkulissen, achten Sie auf eine ruhige Arbeitsatmosphäre und nehmen Sie sich ausreichend Zeit für die Bearbeitung. Füllen Sie den Fragebogen (inkl. allen zwei Teilen) an einem Stück ohne Unterbrechungen aus.

Hinweis: Der gesamte Fragebogen enthält KEINE zurück-Buttons.

5.2 Code

Die Befragung erfolgt anonym. Dennoch ist es wichtig, dass wir die Antworten von der ersten Befragung der App (nach der Testung der App) zuordnen können. Es wird daher ein Code verwendet, der nur von Ihnen nachvollziehbar ist. **Diesen Code haben Sie bereits in der ersten Umfrage verwendet. Bitte geben Sie den Code erneut ein.**

Hinweise:

Ä, Ü etc. werden nicht in AE, UE etc. geändert, sondern bleiben Ä, Ü etc.

Bitte verwenden Sie Großbuchstaben.

Bitte tragen Sie den letzten Buchstaben Ihres (ersten) Vornamens ein (z.B. Max Mustermann = X):

Bitte tragen Sie die letzte Ziffer Ihres Geburtsjahres ein (z.B. 12. Januar 1996 = 6 oder 7. Juli 2000 = 0):

Bitte tragen Sie den zweiten Buchstaben Ihres Geburtsortes ein (z.B. Magdeburg = A):

Bitte tragen Sie den Tag Ihres Geburtsdatums als zweistellige Zahl ein (z.B. 12. Januar 1997 = 12 oder 6. Juli 2003 = 06):

Bitte tragen Sie den ersten Buchstaben des (ersten) Vornamens Ihrer Mutter ein (z.B. Sarah Mustermann = S):

Bitte tragen Sie den letzten Buchstaben des (ersten) Vornamens Ihrer Mutter ein (z.B. Sarah Mustermann = H):

Bitte tragen Sie den Tag des Geburtsdatums Ihrer Mutter als zweistellige Zahl ein (z.B. 17. Juli 1965 = 17 oder 09. August 1959 = 09):

6 Teil 1**TEIL 1****Akzeptanz- und Usabilitytest: Bewertung der AR-Lernumgebung *Elektrolyse von Zinkiodid*****7 Akzeptanz**

Akzeptanz- und Usabilitytest: Bewertung der AR-Lernumgebung *Elektrolyse von Zinkiodid*

- Nun erfolgt die Beurteilung der Tauglichkeit der AR-Lernumgebung für den lernwirksamen Einsatz im Chemieunterricht (CU). Damit sollen Schwachstellen aufgedeckt und konkrete Verbesserungsvorschläge entwickelt werden.
- Um dies zu bewerkstelligen, ist Ihre Expertise als Chemielehrkraft gefragt. Nachdem Sie die AR-Lernumgebung erprobt haben, geben Sie nun Ihr persönliches mediendidaktischer Perspektive ab. Das Augenmerk liegt, neben dem chemischen Inhalt der Redoxreaktionen, auf dem Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis chemischen Repräsentationsformen (Texte, Bilder und Symbole). Grundlage Ihrer Bewertung sind Ihre individuellen Erfahrungen mit der AR-Lernumgebung.
- Hierfür erhalten Sie mehrere Fragen aus unterschiedlichen Norm-Kriterien. Zwischen den Gegensatzpaaren „Trifft gar nicht zu“ und „Trifft vollkommen zu“ Likertskala soll eine Antwort gewählt werden (1=trifft gar nicht zu, 2=trifft weniger zu, 3=trifft weitgehend zu, 4=trifft vollkommen zu). Durch Markierung Ihrer Zustimmung zu einem der Gegensatzpaare und ihren Abstufungen äußern. Entscheiden Sie möglichst spontan, sodass Ihre unmittelbare Einschätzung Bitte klicken Sie immer eine Antwort an, auch wenn Sie bei der Einschätzung zu einem Begriffspaar unsicher sind.

8 Akzeptanz

Akzeptanz

9 1. Akzeptanz

Akzeptanz

Welche der angeführten Aussagen zu der AR-Lernumgebung *Elektrolyse von Zinkiodid* treffen hinsichtlich Ihrer persönlichen Einschätzung für den Einsatz im Chemieunterricht?

Bitte wählen Sie stets eine Antwort aus. Lassen Sie keine der Fragen aus.

	trifft gar nicht zu	trifft weniger zu	trifft weitgehend zu	trifft vollkommen zu
Ich würde die AR-Lernumgebung in meinem eigenen CU einsetzen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die AR-Lernumgebung fand ich für das Verständnis von Redoxreaktionen bzw. der Elektrolyse von Zinkiodid auf Stoff- und Teilchenebene sehr hilfreich.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die AR-Lernumgebung fand ich für den Umgang mit den unterschiedlichen chemischen Repräsentationsformen hilfreich.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Durch die Darstellung der verschiedenen Repräsentationsformen fand ich die AR-Lernumgebung für das Verständnis von Redoxreaktionen auf Stoff- und Teilchenebenen sehr hilfreich.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die AR-Lernumgebung sollte hilfreich für die Auseinandersetzung mit den vorwissenschaftlichen Vorstellungen von Schüler*innen sein und Fehlvorstellungen gegebenenfalls beseitigen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich würde mich gerne über AR-Lehrmaterialien wie die App zur Elektrolyse mit meinen Kolleg*innen austauschen (z.B. gemeinsam entwickeln und kommunizieren).	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich schätze die Kompatibilität der AR-Lernumgebung mit dem schulischen Medienkonzept sehr hoch ein.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

10 Funktionale Gestaltung

FUNKTIONALE GESTALTUNGSKRITERIEN

11 2. Funktionale Gestaltung 1

Instruktionale Unterstützung

Welche der angeführten Aussagen zur instruktionalen Unterstützung der AR-Lernumgebung *Elektrolyse von Zinkiodid* treffen hinsichtlich Ihrer persönlichen Einschätzung?

Bitte wählen Sie stets eine Antwort aus. Lassen Sie keine der Fragen aus.

	trifft gar nicht zu	trifft weniger zu	trifft weitgehend zu	trifft vollkommen zu
Die AR-Lernumgebung bietet gute Möglichkeiten, sich häufig wiederholende Bearbeitungsvorgänge zu automatisieren.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Mir wurde in der Einführung der AR-Lernumgebung (Bedienungsanleitung) verständlich vermittelt, wie ich in den einzelnen Lernpfaden arbeiten soll.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Mir wurde in den Lernpfaden der AR-Lernumgebung verständlich vermittelt, welche Aufgaben in der AR-Lernumgebung bearbeitet werden sollen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Funktionsweisen der AR-Lernumgebung sind gut ohne fremde Hilfe oder Handbuch erlernbar.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich wusste stets, wann ein Lernpfad beendet war.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich wusste stets, wie ich Hilfestellungen in der AR-Lernumgebung erhalte.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

12 2. Funktionale Gestaltung 3

Technik: Funktionalität

Welche der angeführten Aussagen zur technischen Handhabung der AR-Lernumgebung *Elektrolyse von Zinkiodid* treffen hinsichtlich Ihrer persönlichen Einschätzung?

Bitte wählen Sie stets eine Antwort aus. Lassen Sie keine der Fragen aus.

	trifft gar nicht zu	trifft weniger zu	trifft weitgehend zu	trifft vollkommen zu
Die AR-Lernumgebung bietet einen guten Überblick über den Aufbau und das Funktionsangebot.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die AR-Lernumgebung verwendet gut verständliche Bedienelemente (z.B. „Weiter“-Button), Begriffe, Bezeichnungen, Abkürzungen oder Symbole in den Masken und Menüs der Lernpfade.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Navigation in dem AR-Setting fiel mir leicht.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich halte die Funktionsleiste mit dem Menü-, Hilfe- und Info-Button für sinnvoll.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Insgesamt fiel mir die Orientierung in der AR-Lernumgebung leicht.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die AR-Lernumgebung lässt sich durchgehend nach einem einheitlichen Prinzip bedienen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich wusste stets, mit welchen Funktionen bzw. Buttons ich zum nächsten Lernpfad gelange.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich wusste, wie ich von Teil 1 „Vor Anschalten der Gleichspannungsquelle“ zu Teil 2 „Nach Anschalten der Gleichspannungsquelle“ gelange.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die AR-Lernumgebung ermöglicht einen leichten Wechsel zwischen und in den einzelnen Lernpfaden.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

13 2. Funktionale Gestaltung 2

Individualisierbarkeit

Welche der angeführten Aussagen zur Individualisierbarkeit der AR-Lernumgebung *Elektrolyse von Zinkiodid* treffen hinsichtlich Ihrer persönlichen Einschätzung?

Bitte wählen Sie stets eine Antwort aus. Lassen Sie keine der Fragen aus.

	trifft gar nicht zu	trifft weniger zu	trifft weitgehend zu	trifft vollkommen zu
Die AR-Lernumgebung lässt sich ohne großen Aufwand an die persönliche, individuelle Art der Arbeitserledigung anpassen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die AR-Lernumgebung eignet sich für den Einsatz in heterogenen Klassen, da sie sich adaptiv an den unterschiedlichen Kenntnisständen der Schüler*innen orientiert.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Möglichkeiten, die Lerngeschwindigkeit ausreichend an meine individuellen Bedürfnisse anzupassen, sind sehr gegeben.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die AR-Lernumgebung ist so gestaltet, dass ich selbst beeinflussen kann, wie und welche Informationen am Bildschirm dargeboten werden.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

14 Methodische Gestaltungskriterien: Problemorientierte Didaktik

METHODISCHE GESTALTUNGSKRITERIEN

15 3. Methodische Gestaltungskriterien: Problemorientierte Didaktik

Problemorientierte Didaktik

Welche der angeführten Aussagen zur problemorientierten Didaktik der AR-Lernumgebung *Elektrolyse von Zinkiodid* treffen hinsichtlich Ihrer persönlichen Ein

Bitte wählen Sie stets eine Antwort aus. Lassen Sie keine der Fragen aus.

	trifft gar nicht zu	trifft weniger zu	trifft weitgehend zu	trifft vollkommen zu
Die Veranschaulichung der Redoxreaktionen bzw. Elektrolyse von Zinkiodid an einem authentischen Fall (dem realen Experiment) ist für das Stoff-Teilchen-Konzept-Verständnis sehr hilfreich.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Veranschaulichung der Redoxreaktionen bzw. Elektrolyse von Zinkiodid an einem authentischen Fall (dem realen Experiment) ist für den Umgang mit chemischen Repräsentationsformen hilfreich.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Veranschaulichung der Redoxreaktionen bzw. Elektrolyse von Zinkiodid an einem authentischen Fall (dem realen Experiment) ist für die Auseinandersetzung mit den vorwissenschaftlichen Vorstellungen von Schüler*innen hilfreich und beseitigt gegebenenfalls Fehlvorstellungen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Einbindung der verschiedenen Repräsentationsformen zur Veranschaulichung der Redoxreaktionen bzw. Elektrolyse von Zinkiodid an einem authentischen Fall (dem realen Experiment) ist für das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis sehr hilfreich.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Konkrete Aufgabenstellungen in der AR-Lernumgebung sind für das Verständnis von Redoxreaktionen bzw. der Elektrolyse von Zinkiodid auf Stoff- und Teilchenebene sehr hilfreich.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Konkrete Aufgabenstellungen in der AR-Lernumgebung sind für den Umgang mit den chemischen Repräsentationsformen hilfreich.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Konkrete Aufgabenstellungen zum Umgang mit den chemischen Repräsentationsformen in der AR-Lernumgebung sind für das Verständnis von Redoxreaktionen bzw. der Elektrolyse von Zinkiodid auf Stoff- und Teilchenebene hilfreich.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Konkrete Aufgabenstellungen in der AR-Lernumgebung sind für die Auseinandersetzung mit den vorwissenschaftlichen Vorstellungen von Schüler*innen hilfreich und beseitigen Fehlvorstellungen gegebenenfalls.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Elektrolyse von Zinkiodid wird aus verschiedenen fachdidaktischen Blickwinkeln betrachtet.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die chemische Fachsprache wird aus verschiedenen fachdidaktischen Blickwinkeln betrachtet.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Das Teilchenmodell wird aus verschiedenen fachdidaktischen Blickwinkeln betrachtet.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
In der AR-Lernumgebung wird durch die verschiedenen chemischen Repräsentationsformen die selbstgesteuerte Auseinandersetzung mit Redoxreaktionen bzw. der Elektrolyse von Zinkiodid auf Stoff- und Teilchenebene ermöglicht.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
In der AR-Lernumgebung wird die selbstgesteuerte Auseinandersetzung mit Redoxreaktionen bzw. der Elektrolyse von Zinkiodid auf Stoff- und Teilchenebene sehr ermöglicht.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
In der AR-Lernumgebung wird die selbstgesteuerte Auseinandersetzung mit chemischen Repräsentationsformen sehr ermöglicht.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Darstellung der chemischen Reaktionen (blauer Lernpfad) durch die verschiedenen Repräsentationsformen in der AR-Lernumgebung könnte auch in meinem eigenen CU thematisiert werden.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Die Darstellung der Prozesse auf Teilchenebene (roter Lernpfad) durch die verschiedenen Repräsentationsformen in der AR-Lernumgebung könnte auch in meinem eigenen CU ausgiebig thematisiert werden.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Inhalte des Versuchsaufbaus (gelber Lernpfad) in der AR-Lernumgebung könnten auch in meinem eigenen CU thematisiert werden.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

16 Mediendid: Verständlichkeit der Medien

MEDIENDIDAKTISCHE GESTALTUNGSKRITERIEN

17 4. Mediendid: Verständlichkeit der Medien

Verständlichkeit der Medien

Welche der angeführten Aussagen zur Verständlichkeit der Medien bzw. Darstellungsformen in der AR-Lernumgebung *Elektrolyse von Zinkiodid* treffen hinsichtlich Einschätzung am ehesten zu?

Bitte wählen Sie stets eine Antwort aus. Lassen Sie keine Frage aus.

	trifft gar nicht zu	trifft weniger zu	trifft weitgehend zu	trifft vollkommen zu
Die Texte sind sehr verständlich geschrieben.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Texte sind zu lang.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Fachbegriffe werden erklärt.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Bilder sind inhaltlich sehr verständlich.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Symbole sind inhaltlich sehr verständlich.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Repräsentationsformen sind innerhalb eines Lernpfades inhaltlich aufeinander bezogen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Repräsentationsformen sind thematisch bzw. inhaltlich zusammenhängend auf dem Bildschirm angeordnet.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Repräsentationsformen sind auf dem Bildschirm räumlich und zeitlich zusammenhängend angeordnet.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die (Schrift-)Größen und Farben der Repräsentationsformen waren sehr gut lesbar.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Das Tempo bei der augmentierten Darstellung der Prozesse auf Teilchenebene (rote Lernpfade) war (durch die Einstellung der Geschwindigkeit) sehr passend.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die augmentierten Elemente wirkten in der Ansicht durch das iPad auf das Experiment gedrängt.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Durch das beliebige Ein- und Ausblenden von Informationen konnten unterschiedliche Inhalte in einem Menüpunkt (Text, Symbol oder Bild) inhaltlich verständlich verknüpft werden.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

18 5. Mediendid: Wirkung Medien

Wirkung der Medien

Welche der angeführten Aussagen zur Wirkung der Medien bzw. Darstellungsformen in der AR-Lernumgebung *Elektrolyse von Zinkiodid* treffen hinsichtlich Ihrer Einschätzung am ehesten zu?

Bitte wählen Sie stets eine Antwort aus. Lassen Sie keine Frage aus.

	trifft gar nicht zu	trifft weniger zu	trifft weitgehend zu	trifft vollkommen zu
Das Wissen zu Redoxreaktionen bzw. der Elektrolyse von Zinkiodid kann durch die medialen Visualisierungen auf Stoff- und Teilchenebene sehr vertieft werden.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die mediale Aufbereitung der chemischen Inhalte hat geholfen, Zusammenhänge zum Thema Redoxreaktionen bzw. Elektrolyse von Zinkiodid auf Stoff- und Teilchenebene sehr viel besser zu verstehen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Die mediale Aufbereitung der chemischen Inhalte hat geholfen, fachsprachliche Zusammenhänge zum Thema Redoxreaktionen bzw. Elektrolyse von Zinkiodid besser zu verstehen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Texte sind für den Umgang mit der chemischen Fachsprache hilfreich.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Texte sind für die Auseinandersetzung mit den vorwissenschaftlichen Vorstellungen von Schüler*innen hilfreich und beseitigen gegebenenfalls Fehlvorstellungen zu Redoxreaktionen bzw. zur Elektrolyse von Zinkiodid.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Texte sind für das Verständnis von Redoxreaktionen bzw. Elektrolyse von Zinkiodid auf Stoff- und Teilchenebene sehr hilfreich.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Bilder sind für den Umgang mit der chemischen Fachsprache hilfreich.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Bilder sind für das Verständnis von Redoxreaktionen bzw. der Elektrolyse von Zinkiodid auf Stoff und Teilchenebene sehr hilfreich.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Bilder sind für die Auseinandersetzung mit den vorwissenschaftlichen Vorstellungen von Schüler*innen hilfreich und beseitigen gegebenenfalls Fehlvorstellungen zu Redoxreaktionen bzw. zur Elektrolyse von Zinkiodid.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Symbole sind für das Verständnis von Redoxreaktionen bzw. der Elektrolyse von Zinkiodid auf Stoff- und Teilchenebene sehr hilfreich.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Symbole sind für den Umgang mit der chemischen Fachsprache hilfreich.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Symbole sind für die Auseinandersetzung mit den vorwissenschaftlichen Vorstellungen von Schüler*innen hilfreich und beseitigen gegebenenfalls Fehlvorstellungen zu Redoxreaktionen bzw. zur Elektrolyse von Zinkiodid.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die dynamische Darstellung der Prozesse auf Teilchenebene war für das Stoff-Teilchen-Konzept-Verständnis sehr hilfreich.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die dynamische Darstellung der Prozesse auf Teilchenebene war für das Verständnis der chemischen Fachsprache hilfreich.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die dynamische Darstellung der Prozesse auf Teilchenebene war für die Auseinandersetzung mit den vorwissenschaftlichen Vorstellungen von Schüler*innen hilfreich und beseitigt gegebenenfalls Fehlvorstellungen zu Redoxreaktionen bzw. zur Elektrolyse von Zinkiodid.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

19 Did:Lernprozess

Didaktische Gestaltungskriterien

20 6. Didaktik: Lernprozess

Lernprozess: Voraussichtliche Motivation

Welche der angeführten Aussagen zu der AR-Lernumgebung *Elektrolyse von Zinkiodid* treffen hinsichtlich Ihrer persönlichen Einschätzung für den Einsatz im Chemieunterricht zu?

Bitte wählen Sie stets eine Antwort aus. Lassen Sie keine Frage aus.

	trifft gar nicht zu	trifft weniger zu	trifft weitgehend zu	trifft vollkommen zu
Die Bearbeitung der AR-Lernumgebung sollte das Interesse der Lernenden zu Redoxreaktionen auf Stoff- und Teilchenebene wecken.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Bearbeitung der AR-Lernumgebung sollte das Interesse der Lernenden zum Umgang mit den chemischen Repräsentationsformen wecken.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Die Bearbeitung der AR-Lernumgebung sollte durch die verschiedenen chemischen Repräsentationsformen das Interesse an Redoxreaktionen auf Stoff- und Teilchenebene wecken,	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die AR-Lernumgebung weckt bei Lernenden voraussichtlich die Neugier am Umgang mit den verschiedenen Repräsentationsformen,	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die AR-Lernumgebung weckt bei Lernenden voraussichtlich die Neugier an Redoxreaktionen auf Stoff- und Teilchenebene,	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Durch die verschiedenen chemischen Repräsentationsformen weckt die AR-Lernumgebung bei Lernenden voraussichtlich die Neugier an Redoxreaktionen auf Stoff- und Teilchenebene,	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

21 7. Didaktik: voraussichtlicher Lernerfolg / Lerntransfer

Lerntransfer: Voraussichtlicher Lernerfolg

Welche der angeführten Aussagen zu der AR-Lernumgebung *Elektrolyse von Zinkiodid* treffen hinsichtlich Ihrer persönlichen Einschätzung für den Einsatz im C-ehesten zu?

Bitte wählen Sie stets eine Antwort aus. Lassen Sie keine Frage aus.

	trifft gar nicht zu	trifft weniger zu	trifft weitgehend zu	trifft vollkommen zu
Durch die AR-Lernumgebung können Lernende voraussichtlich selbstreguliert arbeiten.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Durch die AR-Lernumgebung können Lernende voraussichtlich kooperativ arbeiten.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Durch die AR-Lernumgebung können Lernende voraussichtlich kollaborativ arbeiten.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Durch die AR-Lernumgebung können sich Lernende voraussichtlich in großem Maße Wissen über Redoxreaktionen auf Stoff- und Teilchenebene aneignen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Durch die AR-Lernumgebung können sich Lernende voraussichtlich Wissen über die chemische Fachsprache aneignen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Durch die Darstellung der verschiedenen Repräsentationsformen in der AR-Lernumgebung können sich Lernende voraussichtlich in großem Maße Wissen über Redoxreaktionen auf Stoff- und Teilchenebene aneignen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Durch die AR-Lernumgebung können sich Lernende mit ihren vorwissenschaftlichen Vorstellungen auseinandersetzen und Fehlvorstellungen gegebenenfalls beseitigen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die AR-Lernumgebung sollte Lernenden voraussichtlich helfen, fachsprachliche Zusammenhänge besser zu verstehen,	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die AR-Lernumgebung sollte Lernenden voraussichtlich sehr helfen, chemische Zusammenhänge auf Stoff- und Teilchenebene besser zu verstehen,	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die AR-Lernumgebung sollte durch die Darstellung unterschiedlicher Repräsentationsformen Lernenden voraussichtlich helfen, chemische Zusammenhänge auf Stoff- und Teilchenebene besser zu verstehen,	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die fachwissenschaftlichen und -didaktischen Inhalte der AR-Lernumgebung sind für den CU hilfreich,	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Den Lernenden sollte durch die Bearbeitung der AR-Lernumgebung klar werden, in welchen praktischen Situationen sie das erworbene Wissen verwenden können,	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Orientierung an den verschiedenen Lernpfaden sollte die chemische Fachsprache der Lernenden fördern,	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Orientierung an den verschiedenen Lernpfaden sollte das Verständnis von Redoxreaktionen auf Stoff- und Teilchenebene bei Lernenden fördern,	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Orientierung an den verschiedenen Lernpfaden sollte durch die Darstellung der verschiedenen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Repräsentationsformen das Verständnis von Redoxreaktionen auf Stoff- und Teilchenebene bei Lernenden fördern.

Die Orientierung an den verschiedenen Lernpfaden sollte eine Auseinandersetzung mit den vorwissenschaftlichen Vorstellungen bei Lernenden ermöglichen und Fehlvorstellungen gegebenenfalls beseitigen.

Die Inhalte der AR-Lernumgebung sind für nachfolgende, weitere chemische Themengebiete in der Schule bzw. im Studium hilfreich.

<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

22 zu Teil 2

Sie haben den ersten Teil des Fragebogens erfolgreich ausgefüllt.

23 Teil 2

TEIL 2

Akzeptanz- und Usabilitytest: Offene Fragen zur Bewertung der Tauglichkeit der AR-Lernumgebung *Elektrolyse*

24 Allgemeines zur AR-Lernumgebung

ALLGEMEINES ZUR AR-LERNUMGEBUNG

25 Offene Fragen zur AR-Lernumgebung 1

ALLGEMEINES ZUR AR-LERNUMGEBUNG

1. Beschreiben Sie, was Ihnen aus fach- und mediendidaktischer Sicht besonders gut an der AR-Lernumgebung gefallen hat.

2. Beschreiben Sie, was Sie aus fach- und mediendidaktischer Sicht an der AR-Lernumgebung verändern bzw. verbessern würden.

3. Reflektieren Sie, welche Vorteile sich durch den Einsatz der AR-Lernumgebung im CU in Vergleich zu herkömmlichen Lernmedien ergeben.

4. Reflektieren Sie, welche technischen, medien- und fachdidaktischen oder pädagogischen Schwierigkeiten sich bei der Bedienung der AR-L

5. Erklären Sie, welche Informationen, um Wissen zu erwerben, das zur Auswertung des chemischen Experiments Elektrolyse von Zinkiodid i Lernumgebung fehlen und ergänzt werden müssen.

26 STW und AR-Lernumgebung

STOFF- UND TEILCHENEbenen IN DER AR-LERNUMGEBUNG

27 Offene Fragen zur AR-Lernumgebung 2

STOFF- UND TEILCHENEbenen IN DER AR-LERNUMGEBUNG

6. Reflektieren Sie, ob die AR-Lernumgebung unterstützend für Ihre Beschreibungen und Erläuterungen zu den chemischen Prozessen des E-Zinkiodid auf Stoff- und Teilchenebene wirkte. Bitte begründen Sie kurz Ihre Einschätzung.

7. Reflektieren Sie, ob Sie die AR-Lernumgebung motiviert hat, sich bewusst mit dem Wechsel von Stoff- auf Teilchenebene auseinanderzusetzen.

8. Erklären Sie, welche Informationen in der AR-Lernumgebung fehlen, um den Wechsel von Stoff- auf Teilchenebene besser zu verdeutlichen?

28 (M)ER und AR-Lernumgebung

REPRÄSENTATIONSFORMEN IN DER AR-LERNUMGEBUNG

29 Offene Fragen zur AR-Lernumgebung 3

REPRÄSENTATIONSFORMEN IN DER AR-LERNUMGEBUNG

9. Reflektieren Sie, ob die AR-Lernumgebung unterstützend für Ihre Beschreibungen und Erläuterungen zu den chemischen Prozessen des E-Zinkiodid mithilfe der unterschiedlichen chemischen Repräsentationsformen wirkte? Bitte begründen Sie kurz Ihre Einschätzung.

10. Reflektieren Sie, ob Sie die AR-Lernumgebung motiviert hat, sich bewusst mit den unterschiedlichen chemischen Repräsentationsformen Wechseln auseinanderzusetzen?

11. Erklären Sie, welche Informationen in der AR-Lernumgebung fehlen, um die verschiedenen chemischen Repräsentationsformen und deren Wechsel zu verdeutlichen?

30 Endseite

Vielen Dank, dass Sie sich die Zeit genommen haben an der Befragung teilzunehmen.

Wenden Sie sich nun an die Projektleitung, um - falls noch nicht geschehen - die Testaufgaben per lautem Denken zu erörtern.
Die Studie ist nach der Bearbeitung der Testaufgaben und des Usability-Tests offiziell beendet.
Für Rückfragen steht Ihnen die Projektleitung Melanie Ripsam (eMail: melanie.ripsam@tum.de oder Tel: 0176 83 21 67 22) jederzeit zur Verfügung.

A.2.2 Reliabilitätsanalysen

Tabelle A7. Skalenreliabilitäten des Akzeptanz- und Usability-Tests hinsichtlich der drei Vergleichsgruppen

Hauptskalen Akzeptanz und Usability	Cronbachs Alpha		
	Simulation (N = 35)	AR (N = 46)	HMD-AR (N = 41)
Akzeptanz (n = 7)	.77	.81	.79
Angemessenheit (n = 6)	.71	.80	.77
Technik (n = 9)	.90	.89	.84
Individualisierbarkeit (n = 4)	.53	.68	.79
Problemorientierte Didaktik (n = 17)	.87	.90	.90
Verständlichkeit der Medien (n = 12)	.83	.70	.73
Wirkung der Medien (n = 15)	.88	.90	.91
Voraussichtliche Motivation (n = 6)	.83	.83	.78
Voraussichtlicher Lernerfolg (n = 17)	.77	.91	.84

Tabelle A8. Test der Varianzhomogenität.

Usability- und Akzeptanz-Skala (Basiert auf dem Mittelwert)	Levene-Statistik	df1	df2	Sig.
Akzeptanz	0.978	2	119	.379
Angemessenheit	1.165	2	119	.315
Technik	0.299	2	119	.742
Individualisierbarkeit	1.578	2	119	.211
ProblemorientierteDidaktik	0.293	2	119	.747
VerständlichkeitMedien	0.316	2	119	.730
WirkungMedien	0.268	2	119	.765
Voraussichtliche Motivation	0.899	2	119	.410
Voraussichtlicher Lernerfolg	2.642	2	119	.075

A.2.2.1 Item-Skala-Statistiken Vorbefragung

Tabelle A9. Item-Skala-Statistiken zu den Einstellungen in den Subskalen (dig_gesamt).

	Skala Einstellungen zu digitalen Medien (gesamt)	Korrigierte Item-Skala-Korrelation	Cronbachs Alpha, wenn Item weglassen
E2_dig TPK	Der Einsatz digitaler Medien ermöglicht in hohem Maße selbstbestimmtes Lernen.	.548	.872
E3_dig TPCK	Durch den Einsatz digitaler Medien können Schüler*innen besser zum Lernen im Fach Chemie motiviert werden.	.596	.870
E4_dig TPCK	Digitale Medien eröffnen Spielräume für Kreativität beim Lernen chemischer Inhalte.	.462	.874
E5_dig TPK	Der Einsatz von digitalen Medien in der Schule sorgt dafür, dass Lernende gut auf das Berufsleben vorbereitet werden.	.294	.880
E6_dig TPCK	Das Lernen mit digitalen Medien ist eine effiziente Form des Lernens im Fach Chemie.	.433	.875
E7_dig TPCK	Mit digitalen Medien kann ich CU adressatengerechter planen und anpassen.	.558	.871
E8_dig TPK	Digitale Medien erlauben eine höhere Schüleraktivierung.	.523	.872
E9_dig TPCK	Für mich sind digitale Medien ein nützliches Arbeitsmittel zur Förderung des Stoff-Teilchen-Konzeptverständnisses im CU.	.552	.871
E10_dig TPCK	Für mich sind digitale Medien ein nützliches Arbeitsmittel zur Förderung der chemischen Fachsprache im CU.	.555	.871
E11_dig TPCK	Für mich sind digitale Medien ein sehr nützliches Arbeitsmittel zur Darstellung verschiedener Repräsentationsformen auf Stoff- und Teilchenebene.	.535	.872
E12_dig TPCK	Für mich sind digitale Medien ein nützliches Arbeitsmittel um vorwissenschaftliche Vorstellungen von Schüler*innen im CU zu thematisieren und Fehlvorstellungen gegebenenfalls zu beseitigen.	.533	.872
E14_dig TPK	Der Einsatz neuer Technologien im CU kann das kollaborative Arbeiten der Schüler*innen fördern.	.480	.874
E15_dig TPK	Der Einsatz digitaler Medien im CU kann das kooperative Arbeiten der Schüler*innen fördern.	.513	.872
E16_dig TPK	Der Einsatz digitaler Medien im CU kann das selbstregulierte Lernen der Schüler*innen fördern.	.596	.869
E17_dig TPCK	Der Einsatz digitaler Medien kann die Fähigkeiten beim Experimentieren im CU fördern.	.379	.878
E18_dig	Ich würde es begrüßen, wenn digitale Medien häufiger für Lehr- und Lernzwecke genutzt würden.	.632	.868

E22_dig	Ich finde die Auseinandersetzung mit digitalen Medien spannend.	.484	.874
E24_dig	Ich kann mir das Arbeiten ohne digitale Medien kaum noch vorstellen.	.423	.876

Tabelle A10. Item-Skala-Statistiken zu den Einstellungen in den Subskalen (dig_TPK).

	Subskala Einstellungen zu digitalen Medien TPK	Korrigierte Item-Skala-Korrelation	Cronbachs Alpha, wenn Item weggelassen
E2_dig TPK	Der Einsatz digitaler Medien ermöglicht in hohem Maße selbstbestimmtes Lernen.	.513	.692
E5_dig TPK	Der Einsatz von digitalen Medien in der Schule sorgt dafür, dass Lernende gut auf das Berufsleben vorbereitet werden.	.216	.766
E8_dig TPK	Digitale Medien erlauben eine höhere Schüleraktivierung.	.391	.727
E14_dig TPK	Der Einsatz neuer Technologien im CU kann das kollaborative Arbeiten der Schüler*innen fördern.	.595	.662
E15_dig TPK	Der Einsatz digitaler Medien im CU kann das kooperative Arbeiten der Schüler*innen fördern.	.618	.655
E16_dig TPK	Der Einsatz digitaler Medien im CU kann das selbstregulierte Lernen der Schüler*innen fördern.	.546	.678

Tabelle A11. Item-Skala-Statistiken zu den Einstellungen in den Subskalen (dig_TPCK/Allg).

	Skala Einstellungen zu digitalen Medien TPCK	Korrigierte Item-Skala-Korrelation	Cronbachs Alpha, wenn Item weggelassen
E3_dig TPCK	Durch den Einsatz digitaler Medien können Schüler*innen besser zum Lernen im Fach Chemie motiviert werden.	.559	.789
E4_dig TPCK	Digitale Medien eröffnen Spielräume für Kreativität beim Lernen chemischer Inhalte.	.392	.806
E6_dig TPCK	Das Lernen mit digitalen Medien ist eine effiziente Form des Lernens im Fach Chemie.	.447	.800
E7_dig TPCK	Mit digitalen Medien kann ich CU adressatengerechter planen und anpassen.	.548	.788

E9_dig TPCK	Für mich sind digitale Medien ein nützliches Arbeitsmittel zur Förderung des Stoff-Teilchen-Konzeptverständnisses im CU.	.609	.779
E10_dig TPCK	Für mich sind digitale Medien ein nützliches Arbeitsmittel zur Förderung der chemischen Fachsprache im CU.	.621	.777
E11_dig TPCK	Für mich sind digitale Medien ein sehr nützliches Arbeitsmittel zur Darstellung verschiedener Repräsentationsformen auf Stoff- und Teilchenebene.	.532	.790
E12_dig TPCK	Für mich sind digitale Medien ein nützliches Arbeitsmittel um vorwissenschaftliche Vorstellungen von Schüler*innen im CU zu thematisieren und Fehlvorstellungen gegebenenfalls zu beseitigen.	.543	.788
E17_dig TPCK	Der Einsatz digitaler Medien kann die Fähigkeiten beim Experimentieren im CU fördern.	.345	.815
Skala Einstellungen zu digitalen Medien Allg		Korrigierte Item-Skala-Korrelation	Cronbachs Alpha, wenn Item weglassen
E18_dig Allg	Ich würde es begrüßen, wenn digitale Medien häufiger für Lehr- und Lernzwecke genutzt würden.	.508	.515
E22_dig Allg	Ich finde die Auseinandersetzung mit digitalen Medien spannend.	.545	.493
E24_dig Allg	Ich kann mir das Arbeiten ohne digitale Medien kaum noch vorstellen.	.391	.696

Tabelle A12. Item-Skala-Statistiken zu den Einstellungen in den Subskalen (aug_gesamt).

Einstellungen zu AR gesamt		Korrigierte Item-Skala-Korrelation	Cronbachs Alpha, wenn Item weglassen
E1_aug_TPK	Innovationen wie Augmented Reality sollten generell in den Fachlehrplänen der Schulen ein starkes Gewicht erhalten.	.503	.883
E2_aug TPK	Der Einsatz von Innovationen wie Augmented Reality ermöglicht (voraussichtlich) in hohem Maße selbstbestimmtes Lernen.	.570	.881
E3_aug TPCK	Durch den Einsatz von Innovationen wie Augmented Reality können Schüler*innen (voraussichtlich) besser zum Lernen im Fach Chemie motiviert werden.	.620	.880

E4_aug TPCK	Innovationen wie Augmented Reality eröffnen (voraussichtlich) Spielräume für Kreativität beim Lernen chemischer Inhalte.	.490	.883
E5_aug TPK	Der Einsatz von Innovationen wie Augmented Reality in der Schule sorgt dafür, dass Lernende gut auf das Berufsleben vorbereitet werden.	.454	.884
E6_aug TPCK	Das Lernen mit Innovationen wie Augmented Reality ist (voraussichtlich) eine effiziente Form des Lernens im Fach Chemie.	.540	.881
E7_aug TPCK	Mit Innovationen wie Augmented Reality kann ich CU adressatengerechter planen und anpassen.	.575	.880
E8_aug TPK	Innovationen wie Augmented Reality erlauben (voraussichtlich) eine höhere Schüleraktivierung.	.545	.881
E9_aug TPCK	Für mich sind Innovationen wie Augmented Reality ein nützliches Arbeitsmittel zur Förderung des Stoff-Teilchen-Konzeptverständnisses von Schüler*innen im CU.	.530	.882
E10_aug TPCK	Für mich sind Innovationen wie Augmented Reality ein nützliches Arbeitsmittel zur Förderung der chemischen Fachsprache im CU.	.580	.880
E11_aug TPCK	Für mich sind Innovationen wie Augmented Reality ein nützliches Arbeitsmittel zur Darstellung verschiedener Repräsentationsformen auf Stoff- und Teilchenebene.	.491	.883
E12_aug TPCK	Für mich sind Innovationen wie Augmented Reality ein nützliches Arbeitsmittel, um vorwissenschaftliche Vorstellungen von Schüler*innen im CU zu thematisieren und Fehlvorstellungen gegebenenfalls zu beseitigen.	.372	.887
E14_aug TPK	Der Einsatz von Innovationen wie Augmented Reality im CU kann das kollaborative Arbeiten der Schüler*innen fördern.	.579	.880
E15_aug TPK	Der Einsatz von Innovationen wie Augmented Reality im CU kann das kooperative Arbeiten der Schüler*innen fördern.	.563	.881
E16_aug TPK	Der Einsatz von Innovationen wie Augmented Reality im CU kann das selbstregulierte Lernen der Schüler*innen fördern.	.544	.881
E17_aug TPCK	Der Einsatz von Innovationen wie Augmented Reality kann die Fähigkeiten beim Experimentieren im CU fördern.	.366	.888
E18_aug TK	Ich würde es begrüßen, wenn Innovationen wie Augmented Reality häufiger für Lehr- und Lernzwecke genutzt würden.	.582	.880
E20_aug TK	Ich finde die Auseinandersetzung mit Innovationen wie Augmented Reality spannend.	.482	.883
E21_aug TK	Ich würde gerne mehr über die unterschiedlichen Einsatzmöglichkeiten von Innovationen	.442	.884

	wie Augmented Reality im CU wissen, als ich jetzt weiß.		
E22_aug TK	Ich probiere gerne neue innovative, technische Anwendungen aus.	.284	.888

Tabelle A13. Item-Skala-Statistiken zu den Einstellungen in den Subskalen (aug_TPCK/TPK).

Einstellungen zu AR TPCK		Korrigierte Item-Skala-Korrelation	Cronbachs Alpha, wenn Item weggelassen
E3_aug TPCK	Durch den Einsatz von Innovationen wie Augmented Reality können Schüler*innen (voraussichtlich) besser zum Lernen im Fach Chemie motiviert werden.	.517	.784
E4_aug TPCK	Innovationen wie Augmented Reality eröffnen (voraussichtlich) Spielräume für Kreativität beim Lernen chemischer Inhalte.	.331	.804
E6_aug TPCK	Das Lernen mit Innovationen wie Augmented Reality ist (voraussichtlich) eine effiziente Form des Lernens im Fach Chemie.	.542	.779
E7_aug TPCK	Mit Innovationen wie Augmented Reality kann ich CU adressatengerechter planen und anpassen.	.551	.778
E9_aug TPCK	Für mich sind Innovationen wie Augmented Reality ein nützliches Arbeitsmittel zur Förderung des Stoff-Teilchen-Konzeptverständnisses von Schüler*innen im CU.	.644	.763
E10_aug TPCK	Für mich sind Innovationen wie Augmented Reality ein nützliches Arbeitsmittel zur Förderung der chemischen Fachsprache im CU.	.581	.773
E11_aug TPCK	Für mich sind Innovationen wie Augmented Reality ein nützliches Arbeitsmittel zur Darstellung verschiedener Repräsentationsformen auf Stoff- und Teilchenebene.	.561	.775
E12_aug TPCK	Für mich sind Innovationen wie Augmented Reality ein nützliches Arbeitsmittel, um vorwissenschaftliche Vorstellungen von Schüler*innen im CU zu thematisieren und Fehlvorstellungen gegebenenfalls zu beseitigen.	.451	.791
E17_aug TPCK	Der Einsatz von Innovationen wie Augmented Reality kann die Fähigkeiten beim Experimentieren im CU fördern.	.330	.807
Einstellungen zu AR TPK		Korrigierte Item-Skala-Korrelation	Cronbachs Alpha, wenn Item weggelassen
E2_aug TPK	Der Einsatz von Innovationen wie Augmented Reality ermöglicht (voraussichtlich) in hohem Maße selbstbestimmtes Lernen.	.488	.763

E5_aug TPK	Der Einsatz von Innovationen wie Augmented Reality in der Schule sorgt dafür, dass Lernende gut auf das Berufsleben vorbereitet werden.	.389	.787
E8_aug TPK	Innovationen wie Augmented Reality erlauben (voraussichtlich) eine höhere Schüleraktivierung.	.508	.758
E14_aug TPK	Der Einsatz von Innovationen wie Augmented Reality im CU kann das kollaborative Arbeiten der Schüler*innen fördern.	.653	.720
E15_aug TPK	Der Einsatz von Innovationen wie Augmented Reality im CU kann das kooperative Arbeiten der Schüler*innen fördern.	.703	.705
E16_aug TPK	Der Einsatz von Innovationen wie Augmented Reality im CU kann das selbst-regulierte Lernen der Schüler*innen fördern.	.472	.766

Tabelle A14. Item-Skala-Statistiken zu den Selbstwirksamkeitserwartungen in den Subskalen (gesamt).

	<i>Selbstwirksamkeitserwartungen zu digitalen Medien gesamt</i>	Korrigierte Item-Skala-Korrelation	Cronbachs Alpha, wenn Item weglassen
SW1_dig TPK	Ich komme gut damit zurecht neue digitale Materialien wie Lernvideos oder Animationen für meinen CU zu erstellen.	.574	.859
SW2_dig TPK	Ich finde es leicht, Schüler*innen zu erklären, wie digitale Medien zu bedienen sind.	.520	.861
SW3_dig TPK	Ich selbst kann digitale Medien sinnvoll im CU einsetzen, um Feedback von den Schüler*innen zu erhalten.	.597	.857
SW4_dig TPK	Im CU ein Phänomen oder einen Prozess mithilfe digitaler Medien zu modellieren fällt mir leicht.	.619	.856
SW5_dig TPK	Ich bin grundsätzlich in der Lage digitale Medien zielgerichtet im CU einzusetzen.	.652	.856
SW6dig TPK	Ich selbst kann digitale Medien sinnvoll im CU einsetzen, um das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis von Schüler*innen zu fördern.	.454	.864
SW7_dig TPK	Ich weiß worauf ich achten muss, wenn ich mithilfe digitaler Medien die fachsprachliche Kompetenz der Schüler*innen im CU fördern möchte.	.430	.865
SW8_dig TPK	Ich weiß worauf ich achten muss, wenn ich digitale Medien einsetze, um nicht sichtbare chemische Prozesse auf Teilchenebene mithilfe von Repräsentationsformen zu visualisieren.	.479	.863
SW9_dig TPK	Es fällt mir leicht, digitale Medien zum Zwecke der Motivationssteigerung im CU einzusetzen.	.544	.860

SW10_dig TPK	Ich kann digitale Medien zur Förderung des selbstregulierten Lernens im CU einsetzen.	.490	.863
SW11_dig TPK	Ich kann digitale Medien zur Förderung des kooperativen Arbeitens im CU einsetzen.	.465	.864
SW12_dig TPK	Ich kann digitale Medien zur Förderung des kollaborativen Arbeitens im CU einsetzen.	.454	.865
SW13_dig TPCK	Ich weiß wie ich vorgehen muss, um mithilfe digitaler Medien vorwissenschaftliche Vorstellungen von Schüler*innen im CU zu thematisieren und Fehlvorstellungen gegebenenfalls zu beseitigen.	.466	.864
SW15_dig TK	Bei auftretenden technischen Schwierigkeiten benötige ich meist keine Hilfe von anderen Leuten.	.444	.865
SW16_dig TK	Im technischen Umgang mit digitalen Medien und ihren verschiedenen Softwareprogrammen fühle ich mich sicher.	.562	.859

Tabelle A15. Item-Skala-Statistiken zu den Selbstwirksamkeitserwartungen in den Subskalen (dig_TPK/TK/TPCK).

Selbstwirksamkeitserwartungen zu digitalen Medien TPK		Korrigierte Item-Skala-Korrelation	Cronbachs Alpha, wenn Item weggelassen
SW2_dig TPK	Ich finde es leicht, Schüler*innen zu erklären, wie digitale Medien zu bedienen sind.	.355	.802
SW3_dig TPK	Ich selbst kann digitale Medien sinnvoll im CU einsetzen, um Feedback von den Schüler*innen zu erhalten.	.513	.769
SW9_dig TPK	Es fällt mir leicht, digitale Medien zum Zwecke der Motivationssteigerung im CU einzusetzen.	.539	.763
SW10_dig TPK	Ich kann digitale Medien zur Förderung des selbstregulierten Lernens im CU einsetzen.	.636	.738
SW11_dig TPK	Ich kann digitale Medien zur Förderung des kooperativen Arbeitens im CU einsetzen.	.626	.741
SW12_dig TPK	Ich kann digitale Medien zur Förderung des kollaborativen Arbeitens im CU einsetzen.	.610	.744
Selbstwirksamkeitserwartungen zu digitalen Medien TPCK		Korrigierte Item-Skala-Korrelation	Cronbachs Alpha, wenn Item weggelassen
SW1_dig TPCK	Ich komme gut damit zurecht neue digitale Materialien wie Lernvideos oder Animationen für meinen CU zu erstellen.	.495	.797
SW4_dig TPCK	Im CU ein Phänomen oder einen Prozess mithilfe digitaler Medien zu modellieren fällt mir leicht.	.562	.784

SW5_dig TPCK	Ich bin grundsätzlich in der Lage digitale Medien zielgerichtet im CU einzusetzen.	.607	.778
SW6dig TPCK	Ich selbst kann digitale Medien sinnvoll im CU einsetzen, um das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis von Schüler*innen zu fördern.	.576	.782
SW7_dig TPCK	Ich weiß worauf ich achten muss, wenn ich mithilfe digitaler Medien die fachsprachliche Kompetenz der Schüler*innen im CU fördern möchte.	.546	.787
SW8_dig TPCK	Ich weiß worauf ich achten muss, wenn ich digitale Medien einsetze, um nicht sichtbare chemische Prozesse auf Teilchenebene mithilfe von Repräsentationsformen zu visualisieren.	.628	.772
SW13_dig TPCK	Ich weiß wie ich vorgehen muss, um mithilfe digitaler Medien vorwissenschaftliche Vorstellungen von Schüler*innen im CU zu thematisieren und Fehlvorstellungen gegebenenfalls zu beseitigen.	.451	.804
Selbstwirksamkeitserwartungen zu digitalen Medien TK		Korrigierte Item-Skala-Korrelation	Cronbachs Alpha, wenn Item weglassen
SW15_dig TK	Bei auftretenden technischen Schwierigkeiten benötige ich meist keine Hilfe von anderen Leuten.	.680	
SW16_dig TK	Im technischen Umgang mit digitalen Medien und ihren verschiedenen Softwareprogrammen fühle ich mich sicher.	.680	

Tabelle A16. Item-Skala-Statistiken zu den Selbstwirksamkeitserwartungen in den Subskalen (aug_gesamt).

Selbstwirksamkeitserwartungen zu AR gesamt		Korrigierte Item-Skala-Korrelation	Cronbachs Alpha, wenn Item weglassen
SW2_aug TPCK	Ich komme gut damit zurecht Lernumgebungen mit Innovationen wie Augmented Reality für meinen CU zu erstellen.	.706	.968
SW3_aug TPK	Ich finde es leicht, Schüler*innen zu erklären, wie Innovationen wie Augmented Reality zu bedienen sind.	.724	.968
SW4_aug TPK	Ich selbst kann Innovationen wie Augmented Reality sinnvoll im CU einsetzen, um Feedback von den Schüler*innen zu erhalten.	.750	.967
SW5_aug TPCK	Im CU ein Phänomen oder einen Prozess mithilfe Innovationen wie Augmented Reality zu modellieren fällt mir leicht.	.819	.966
SW6_aug TPCK	Ich bin grundsätzlich in der Lage Innovationen wie Augmented Reality zielgerichtet im CU einzusetzen.	.868	.965
SW7_aug TPCK	Ich selbst kann Innovationen wie Augmented Reality sinnvoll im CU einsetzen, um das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis bei Schüler*innen zu fördern.	.864	.965

SW8_aug TPCK	Ich weiß worauf ich achten muss, wenn ich mithilfe von Innovationen wie Augmented Reality die fachsprachliche Kompetenz der Schüler*innen im CU fördern möchte.	.858	.965
SW9_aug TPCK	Ich weiß worauf ich achten muss, wenn ich Innovationen wie Augmented Reality einsetze, um nicht sichtbare chemische Prozesse auf Teilchenebene mithilfe von Repräsentationsformen zu visualisieren.	.868	.965
SW10_aug TPK	Es fällt mir leicht, Innovationen wie Augmented Reality zum Zwecke der Motivationssteigerung im CU einzusetzen.	.809	.967
SW11_aug TPK	Ich kann Innovationen wie Augmented Reality zur Förderung des selbstregulierten Lernens im CU einsetzen.	.886	.964
SW12_aug TPK	Ich kann Innovationen wie Augmented Reality zur Förderung des kooperativen Arbeitens im CU einsetzen.	.892	.964
SW13_aug TPK	Ich kann Innovationen wie Augmented Reality zur Förderung des kollaborativen Arbeitens im CU einsetzen.	.858	.965
SW14_aug TPCK	Ich weiß, wie ich vorgehen muss, um mithilfe von Innovationen wie Augmented Reality vorwissenschaftliche Vorstellungen von Schüler*innen im CU zu thematisieren und Fehlvorstellungen gegebenenfalls zu beseitigen.	.854	.965

Tabelle A17. Item-Skala-Statistiken zu den Selbstwirksamkeitserwartungen in den Subskalen (aug_TPK/TPCK).

	Selbstwirksamkeitserwartungen zu AR TPK	Korrigierte Item-Skala-Korrelation	Cronbachs Alpha, wenn Item weglassen
SW3_aug TPK	Ich finde es leicht, Schüler*innen zu erklären, wie Innovationen wie Augmented Reality zu bedienen sind.	.697	.935
SW4_aug TPK	Ich selbst kann Innovationen wie Augmented Reality sinnvoll im CU einsetzen, um Feedback von den Schüler*innen zu erhalten.	.719	.931
SW10_aug TPK	Es fällt mir leicht, Innovationen wie Augmented Reality zum Zwecke der Motivationssteigerung im CU einzusetzen.	.789	.924
SW11_aug TPK	Ich kann Innovationen wie Augmented Reality zur Förderung des selbstregulierten Lernens im CU einsetzen.	.872	.912
SW12_aug TPK	Ich kann Innovationen wie Augmented Reality zur Förderung des kooperativen Arbeitens im CU einsetzen.	.908	.908
SW13_aug TPK	Ich kann Innovationen wie Augmented Reality zur Förderung des kollaborativen Arbeitens im CU einsetzen.	.874	.912
	Selbstwirksamkeitserwartungen zu AR TPCK	Korrigierte Item-Skala-Korrelation	Cronbachs Alpha, wenn Item weglassen

SW2_aug TPCK	Ich komme gut damit zurecht Lernumgebungen mit Innovationen wie Augmented Reality für meinen CU zu erstellen.	.664	.954
SW5_aug TPCK	Im CU ein Phänomen oder einen Prozess mithilfe Innovationen wie Augmented Reality zu modellieren fällt mir leicht.	.835	.941
SW6_aug TPCK	Ich bin grundsätzlich in der Lage Innovationen wie Augmented Reality zielgerichtet im CU einzusetzen.	.856	.940
SW7_aug TPCK	Ich selbst kann Innovationen wie Augmented Reality sinnvoll im CU einsetzen, um das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis bei Schüler*innen zu fördern.	.864	.938
SW8_aug TPCK	Ich weiß worauf ich achten muss, wenn ich mithilfe von Innovationen wie Augmented Reality die fachsprachliche Kompetenz der Schüler*innen im CU fördern möchte.	.867	.938
SW9_aug TPCK	Ich weiß worauf ich achten muss, wenn ich Innovationen wie Augmented Reality einsetze, um nicht sichtbare chemische Prozesse auf Teilchenebene mithilfe von Repräsentationsformen zu visualisieren.	.886	.936
SW14_aug TPCK	Ich weiß, wie ich vorgehen muss, um mithilfe von Innovationen wie Augmented Reality vorwissenschaftliche Vorstellungen von Schüler*innen im CU zu thematisieren und Fehlvorstellungen gegebenenfalls zu beseitigen.	.844	.940

A.2.2.2 Item-Skala-Statistiken Nachbefragung

Tabelle A18. Item-Skala-Statistiken des Akzeptanz- und Usability-Tests.

	Akzeptanz	Korrigierte Item-Skala-Korrelation	Cronbachs Alpha, wenn Item weggelassen
A2	Ich würde die AR-Lernumgebung in meinem eigenen CU einsetzen.	.612	.759
A3	Die AR-Lernumgebung fand ich für das Verständnis von Redoxreaktionen bzw. der Elektrolyse von Zinkiodid auf Stoff- und Teilchenebene sehr hilfreich.	.735	.746
A4	Die AR-Lernumgebung fand ich für den Umgang mit den unterschiedlichen chemischen Repräsentationsformen hilfreich.	.569	.769
A5	Durch die Darstellung der verschiedenen Repräsentationsformen fand ich die AR-Lernumgebung für das Verständnis von Redoxreaktionen auf Stoff- und Teilchenebenen sehr hilfreich.	.537	.775

A6	Die AR-Lernumgebung sollte hilfreich für die Auseinandersetzung mit den vorwissenschaftlichen Vorstellungen von Schüler*innen sein und Fehlvorstellungen gegebenenfalls beseitigen.	.395	.799
A8Neu	Ich würde mich gerne über AR-Lehrmaterialien wie die App zur Elektrolyse mit meinen Kolleg*innen austauschen (z.B. gemeinsam entwickeln und kommunizieren).	.455	.790
A9_Neu	Ich schätze die Kompatibilität der AR-Lernumgebung mit dem schulischen Medienkonzept sehr hoch ein.	.502	.784
Angemessenheit		Korrigierte Item-Skala-Korrelation	Cronbachs Alpha, wenn Item weggelassen
Ang_Anf3	Die AR-Lernumgebung bietet gute Möglichkeiten, sich häufig wiederholende Bearbeitungsvorgänge zu automatisieren.	.296	.796
Ang_Anf4	Mir wurde in der Einführung der AR-Lernumgebung (Bedienungsanleitung) verständlich vermittelt, wie ich in den einzelnen Lernpfaden arbeiten soll.	.597	.730
Ang_Anf5	Mir wurde in den Lernpfaden der AR-Lernumgebung verständlich vermittelt, welche Aufgaben in der AR-Lernumgebung bearbeitet werden sollen.	.689	.705
Tech_LF1	Die Funktionsweisen der AR-Lernumgebung sind gut ohne fremde Hilfe oder Handbuch erlernbar.	.502	.749
Tech_LF7	Ich wusste stets, wann ein Lernpfad beendet war.	.503	.752
Tech_LF8	Ich wusste stets, wie ich Hilfestellungen in der AR-Lernumgebung erhalte.	.602	.723
Technik		Korrigierte Item-Skala-Korrelation	Cronbachs Alpha, wenn Item weggelassen
Se_E1	Die AR-Lernumgebung bietet einen guten Überblick über den Aufbau und das Funktionsangebot.	.443	.879
Se_E2	Die AR-Lernumgebung verwendet gut verständliche Bedienelemente (z.B. ^Weiter^Button), Begriffe, Bezeichnungen, Abkürzungen oder Symbole in den Masken und Menüs der Lernpfade.	.579	.868
Tech_LF3_Neu	Die Navigation in dem AR-Setting fiel mir leicht.	.643	.862
Tech_LF5	Ich halte die Funktionsleiste mit dem Menü-, Hilfe- und Info-Button für sinnvoll.	.597	.866
Tech_LF6	Insgesamt fiel mir die Orientierung in der AR-Lernumgebung leicht.	.764	.851

EK3	Die AR-Lernumgebung lässt sich durchgehend nach einem einheitlichen Prinzip bedienen.	.615	.866
Tech_LF9	Ich wusste stets, mit welchen Funktionen bzw. Buttons ich zum nächsten Lernpfad gelange.	.711	.856
Tech_LF10	Ich wusste, wie ich von Teil 1 ^Vor Anschalten der Gleichspannungsquelle^ zu Teil 2 ^Nach Anschalten der Gleichspannungsquelle^ gelange.	.535	.871
St4 P_Did21	Die AR-Lernumgebung ermöglicht einen leichten Wechsel zwischen und in den einzelnen Lernpfaden.	.699	.857
Individualisierbarkeit		Korrigierte Item-Skala-Korrelation	Cronbachs Alpha, wenn Item weggelassen
I1	Die AR-Lernumgebung lässt sich ohne großen Aufwand an die persönliche, individuelle Art der Arbeitserledigung anpassen.	.439	.647
I2	Die AR-Lernumgebung eignet sich für den Einsatz in heterogenen Klassen, da sie sich adaptiv an den unterschiedlichen Kenntnisständen der Schüler*innen orientiert.	.510	.600
I3	Die Möglichkeiten, die Lerngeschwindigkeit ausreichend an meine individuellen Bedürfnisse anzupassen, sind sehr gegeben.	.512	.599
St2	Die AR-Lernumgebung ist so gestaltet, dass ich selbst beeinflussen kann, wie und welche Informationen am Bildschirm dargeboten werden.	.431	.649
Problemorientierte Didaktik		Korrigierte Item-Skala-Korrelation	Cronbachs Alpha, wenn Item weggelassen
P_Did2	Die Veranschaulichung der Redoxreaktionen bzw. Elektrolyse von Zinkiodid an einem authentischen Fall (dem realen Experiment) ist für das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis sehr hilfreich.	.410	.892
P_Did3	Die Veranschaulichung der Redoxreaktionen bzw. Elektrolyse von Zinkiodid an einem authentischen Fall (dem realen Experiment) ist für den Umgang mit chemischen Repräsentationsformen hilfreich.	.431	.892
P_Did5	Die Veranschaulichung der Redoxreaktionen bzw. Elektrolyse von Zinkiodid an einem authentischen Fall (dem realen Experiment) ist für die Auseinandersetzung mit den vorwissenschaftlichen Vorstellungen von Schüler*innen hilfreich	.538	.888

	und beseitigt gegebenenfalls Fehlvorstellungen		
P_Did6	Die Einbindung der verschiedenen Repräsentationsformen zur Veranschaulichung der Redoxreaktionen bzw. Elektrolyse von Zinkiodid an einem authentischen Fall (dem realen Experiment) ist für das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis sehr hilfreich.	.599	.886
P_Did7	Konkrete Aufgabenstellungen in der AR-Lernumgebung sind für das Verständnis von Redoxreaktionen bzw. der Elektrolyse von Zinkiodid auf Stoff- und Teilchenebene sehr hilfreich.	.536	.888
P_Did8	Konkrete Aufgabenstellungen in der AR-Lernumgebung sind für den Umgang mit den chemischen Repräsentationsformen hilfreich.	.631	.885
P_Did9	Konkrete Aufgabenstellungen zum Umgang mit den chemischen Repräsentationsformen in der AR-Lernumgebung sind für das Verständnis von Redoxreaktionen bzw. der Elektrolyse von Zinkiodid auf Stoff- und Teilchenebene hilfreich.	.643	.884
P_Did11	Konkrete Aufgabenstellungen in der AR-Lernumgebung sind für die Auseinandersetzung mit den vorwissenschaftlichen Vorstellungen von Schüler*innen hilfreich und beseitigen Fehlvorstellungen gegebenenfalls.	.551	.888
P_Did12	Die Elektrolyse von Zinkiodid wird aus verschiedenen fachdidaktischen Blickwinkeln betrachtet.	.469	.891
P_Did13	Die chemische Fachsprache wird aus verschiedenen fachdidaktischen Blickwinkeln betrachtet.	.558	.888
P_Did14	Das Teilchenmodell wird aus verschiedenen fachdidaktischen Blickwinkeln betrachtet.	.464	.891
P_Did15	In der AR-Lernumgebung wird durch die verschiedenen chemischen Repräsentationsformen die selbstgesteuerte Auseinandersetzung mit Redoxreaktionen bzw. der Elektrolyse von Zinkiodid auf Stoff- und Teilchenebene ermöglicht.	.567	.888
P_Did16	In der AR-Lernumgebung wird die selbstgesteuerte Auseinandersetzung mit Redoxreaktionen bzw. der Elektrolyse von Zinkiodid auf Stoff- und Teilchenebene sehr ermöglicht.	.531	.889

P_Did17	In der AR-Lernumgebung wird die selbstgesteuerte Auseinandersetzung mit chemischen Repräsentationsformen sehr ermöglicht.	.565	.887
P_Did1	Die Darstellung der chemischen Reaktionen (blauer Lernpfad) durch die verschiedenen Repräsentationsformen in der AR-Lernumgebung könnte auch in meinem eigenen CU thematisiert werden.	.596	.886
P_Did19	Die Darstellung der Prozesse auf Teilchenebene (roter Lernpfad) durch die verschiedenen Repräsentationsformen in der AR-Lernumgebung könnte auch in meinem eigenen CU ausgiebig thematisiert werden.	.581	.887
P_Did20	Die Inhalte des Versuchsaufbaus (gelber Lernpfad) in der AR-Lernumgebung könnten auch in meinem eigenen CU thematisiert werden.	.596	.886
	Verständlichkeit der Medien	Korrigierte Item-Skala-Korrelation	Cronbachs Alpha, wenn Item weggelassen
Ver_Me2	Die Texte sind sehr verständlich geschrieben.	.540	.708
Ver_Me3	Die Texte sind zu lang.	.132	.770
Ver_Me4_Neu	Fachbegriffe werden erklärt.	.399	.724
Ver_Me5_Neu	Die Bilder sind inhaltlich sehr verständlich.	.389	.727
Ver_Me7_Neu	Die Symbole sind inhaltlich sehr verständlich.	.406	.726
Ver_Me8_Neu	Die Repräsentationsformen sind innerhalb eines Lernpfades inhaltlich aufeinander bezogen.	.481	.716
Ver_Me9_Neu	Die Repräsentationsformen sind thematisch bzw. inhaltlich zusammenhängend auf dem Bildschirm angeordnet.	.586	.706
Ver_Me11_Neu	Die Repräsentationsformen sind auf dem Bildschirm räumlich und zeitlich zusammenhängend angeordnet.	.571	.704

Ver_Me12_Neu	Die (Schrift-) Größen und Farben der Repräsentationsformen waren sehr gut lesbar.	.502	.709
Ver_Me13_Neu	Das Tempo bei der augmentierten Darstellung der Prozesse auf Teilchenebene (rote Lernpfade) war (durch die Einstellung der Geschwindigkeit) sehr passend.	.412	.723
Ver_Me14_Neu	Die augmentierten Elemente wirkten in der Ansicht durch das iPad auf das Experiment gedrängt.	.097	.770
Ver_Me15_Neu	Durch das beliebige Ein- und Ausblenden von Informationen konnten unterschiedliche Inhalte in einem Menüpunkt (Text, Symbol oder Bild) inhaltlich verständlich verknüpft werden.	.350	.730
Wirkung der Medien		Korrigierte Item-Skala-Korrelation	Cronbachs Alpha, wenn Item weggelassen
Wirk_Me1	Das Wissen zu Redoxreaktionen bzw. der Elektrolyse von Zinkiodid kann durch die medialen Visualisierungen auf Stoff- und Teilchenebene sehr vertieft werden.	.564	.891
Wirk_Me2	Die mediale Aufbereitung der chemischen Inhalte hat geholfen, Zusammenhänge zum Thema Redoxreaktionen bzw. Elektrolyse von Zinkiodid auf Stoff- und Teilchenebene sehr viel besser zu verstehen.	.519	.892
Wirk_Me3	Die mediale Aufbereitung der chemischen Inhalte hat geholfen, fachsprachliche Zusammenhänge zum Thema Redoxreaktionen bzw. Elektrolyse von Zinkiodid besser zu verstehen.	.663	.887
Wirk_Me4	Die Texte sind für den Umgang mit der chemischen Fachsprache hilfreich.	.560	.891
Wirk_Me6	Die Texte sind für die Auseinandersetzung mit den vorwissenschaftlichen Vorstellungen von Schüler*innen hilfreich und beseitigen gegebenenfalls Fehlvorstellungen zu Redoxreaktionen bzw. zur Elektrolyse von Zinkiodid.	.524	.893
Wirk_Me7_Neu	Die Texte sind für das Verständnis von Redoxreaktionen bzw. Elektrolyse von Zinkiodid auf Stoff- und Teilchenebene sehr hilfreich.	.550	.891
Wirk_Me8_Neu	Die Bilder sind für den Umgang mit der chemischen Fachsprache hilfreich.	.679	.886
Wirk_Me9_Neu	Die Bilder sind für das Verständnis von Redoxreaktionen bzw. der Elektrolyse von Zinkiodid auf Stoff und Teilchenebene sehr hilfreich.	.528	.892

Wirk_Me11	Die Bilder sind für die Auseinandersetzung mit den vorwissenschaftlichen Vorstellungen von Schüler*innen hilfreich und beseitigen gegebenenfalls Fehlvorstellungen zu Redoxreaktionen bzw. zur Elektrolyse von Zinkiodid.	.497	.893
Wirk_Me12_Neu	Die Symbole sind für das Verständnis von Redoxreaktionen bzw. der Elektrolyse von Zinkiodid auf Stoff- und Teilchenebene sehr hilfreich.	.562	.891
Wirk_Me13_Neu	Die Symbole sind für den Umgang mit der chemischen Fachsprache hilfreich.	.637	.888
Wirk_Me15	Die Symbole sind für die Auseinandersetzung mit den vorwissenschaftlichen Vorstellungen von Schüler*innen hilfreich und beseitigen gegebenenfalls Fehlvorstellungen zu Redoxreaktionen bzw. zur Elektrolyse von Zinkiodid.	.665	.887
Wirk_Me18	Die dynamische Darstellung der Prozesse auf Teilchenebene war für das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis sehr hilfreich.	.516	.893
Wirk_Me19	Die dynamische Darstellung der Prozesse auf Teilchenebene war für das Verständnis der chemischen Fachsprache hilfreich.	.624	.889
Wirk_Me21	Die dynamische Darstellung der Prozesse auf Teilchenebene war für die Auseinandersetzung mit den vorwissenschaftlichen Vorstellungen von Schüler*innen hilfreich und beseitigt gegebenenfalls Fehlvorstellungen zu Redoxreaktionen bzw. zur Elektrolyse von Zinkiodid	.544	.891
	Motivation	Korrigierte Item-Skala-Korrelation	Cronbachs Alpha, wenn Item weggelassen
M1	Die Bearbeitung der AR-Lernumgebung sollte das Interesse der Lernenden zu Redoxreaktionen auf Stoff- und Teilchenebene wecken.	.465	.809
M2	Die Bearbeitung der AR-Lernumgebung sollte das Interesse der Lernenden zum Umgang mit den chemischen Repräsentationsformen wecken.	.575	.788
M3	Die Bearbeitung der AR-Lernumgebung sollte durch die verschiedenen chemischen Repräsentationsformen das Interesse an Redoxreaktionen auf Stoff- und Teilchenebene wecken.	.662	.770
M5	Die AR-Lernumgebung weckt bei Lernenden voraussichtlich die Neugier am Umgang mit den verschiedenen Repräsentationsformen.	.468	.811

M6	Die AR-Lernumgebung weckt bei Lernenden voraussichtlich die Neugier an Redoxreaktionen auf Stoff- und Teilchenebene.	.638	.774
M7	Durch die verschiedenen chemischen Repräsentationsformen weckt die AR-Lernumgebung bei Lernenden voraussichtlich die Neugier an Redoxreaktionen auf Stoff- und Teilchenebene.	.677	.764
	Voraussichtlicher Lernerfolg	Korrigierte Item-Skala-Korrelation	Cronbachs Alpha, wenn Item weggelassen
LE_LT2	Durch die AR-Lernumgebung können Lernende voraussichtlich kooperativ arbeiten.	.276	.869
LE_LT3	Durch die AR-Lernumgebung können Lernende voraussichtlich kollaborativ arbeiten.	.362	.865
LE_LT4	Durch die AR-Lernumgebung können sich Lernende voraussichtlich in großem Maße Wissen über Redoxreaktionen auf Stoff- und Teilchenebene aneignen.	.385	.861
LE_LT5	Durch die AR-Lernumgebung können sich Lernende voraussichtlich Wissen über die chemische Fachsprache aneignen.	.585	.852
LE_LT6	Durch die Darstellung der verschiedenen Repräsentationsformen in der AR-Lernumgebung können sich Lernende voraussichtlich in großem Maße Wissen über Redoxreaktionen auf Stoff- und Teilchenebene aneignen.	.484	.857
LE_LT8	Durch die AR-Lernumgebung können sich Lernende mit ihren vorwissenschaftlichen Vorstellungen auseinandersetzen und Fehlvorstellungen gegebenenfalls beseitigen.	.561	.854
LE_LT9	Die AR-Lernumgebung sollte Lernenden voraussichtlich helfen, fachsprachliche Zusammenhänge besser zu verstehen.	.610	.851
LE_LT10	Die AR-Lernumgebung sollte Lernenden voraussichtlich sehr helfen, chemische Zusammenhänge auf Stoff- und Teilchenebene besser zu verstehen.	.542	.856
LE_LT11	Die AR-Lernumgebung sollte durch die Darstellung unterschiedlicher Repräsentationsformen Lernenden voraussichtlich helfen, chemische Zusammenhänge auf Stoff- und Teilchenebene besser zu verstehen.	.518	.856

LE_LT12	Die fachwissenschaftlichen und -didaktischen Inhalte der AR-Lernumgebung sind für den CU hilfreich.	.541	.855
LE_LT13	Den Lernenden sollte durch die Bearbeitung der AR-Lernumgebung klar werden, in welchen praktischen Situationen sie das erworbene Wissen verwenden können.	.462	.860
LE_LT14	Die Orientierung an den verschiedenen Lernpfaden sollte die chemische Fachsprache der Lernenden fördern.	.686	.848
LE_LT15	Die Orientierung an den verschiedenen Lernpfaden sollte das Verständnis von Redoxreaktionen auf Stoff- und Teilchenebene bei Lernenden fördern.	.522	.856
LE_LT16	Die Orientierung an den verschiedenen Lernpfaden sollte durch die Darstellung der verschiedenen Repräsentationsformen das Verständnis von Redoxreaktionen auf Stoff- und Teilchenebene bei Lernenden fördern.	.499	.857
LE_LT18	Die Orientierung an den verschiedenen Lernpfaden sollte eine Auseinandersetzung mit den vorwissenschaftlichen Vorstellungen bei Lernenden ermöglichen und Fehlvorstellungen gegebenenfalls beseitigen.	.517	.856
LE_LT19	Die Inhalte der AR-Lernumgebung sind für nachfolgende, weitere chemische Themengebiete in der Schule bzw. im Studium hilfreich.	.430	.859

A.3 Hauptstudie 2

A.3.1 Material

A.3.1.1 Probandeninformation

Einladung zur Teilnahme am Projekt: Wirksamkeit von Augmented Reality (AR) zur Förderung des Stoff-Teilchen-Konzeptverständnisses in der Lehrerbildung und -fortbildung

Probandeninformation

Sehr geehrte Teilnehmerin, sehr geehrter Teilnehmer,

wir bitten Sie, an einer wissenschaftlichen Studie teilzunehmen. In dieser Probandeninformation finden Sie alle wesentlichen Informationen dazu. Bei uns sollen 40 Teilnehmer, angehende Chemielehrkräfte, in die Studie eingeschlossen werden.

Die Studie wird von der Professur für Fachdidaktik Life Sciences der TUM School of Education geplant und durchgeführt.

Unsere Einrichtung finanziert die Studie selbst. Sie wird bisher durch die Professur für Fachdidaktik Life Sciences gefördert. Eine Förderung durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) wurde beantragt.

Sie wurde von einer unabhängigen Ethikkommission geprüft. Im Rahmen der Beratung wurden keine Einwände gegen die Durchführung dieser Studie erhoben.

Zudem ist die wissenschaftliche Untersuchung vom Bayerischen Staatsministerium für Unterricht und Kultus (Az.: IV.7-BO4106.2020/50/8 vom 01.03.2021) sowie von der Leitung Ihrer Schule genehmigt.

Ihre Teilnahme an der Studie ist freiwillig. Wenn Sie nicht teilnehmen wollen oder wenn Sie später Ihre Einwilligung widerrufen, werden Ihnen daraus keine Nachteile entstehen.

Bitte lesen Sie diese Information sorgfältig durch. Die Studienleitung wird mit Ihnen über die Studie sprechen und Ihre Fragen beantworten.

Warum wird diese Studie durchgeführt?

Modellierungsprozesse, die chemische Fachsprache und das Konzeptverständnisses beim Stoff-Teilchen-Ebenenwechsel spielen eine wichtige Rolle für das Lehren und Lernen im Chemieunterricht. Gleichwohl sind hierbei Fehlvorstellungen von Schüler*innen und Lehrkräften sowie Schwierigkeiten beim Lernen und der Vermittlung zu berücksichtigen. Unter Zuhilfenahme digitaler Medien sollen diese verringert oder ganz vermieden werden. Internationale Studien zeigen, dass digitale Medien und insbesondere die AR-Technik einen positiven Einfluss

auf das Unterrichtsfach Chemie haben können. AR verknüpft die virtuelle und reale Welt. Das bedeutet, dass sich der Beobachter physisch in einer realen Umgebung befindet, die zugleich augmentierte Elemente, d.h. die Realität erweiternde Elemente, integriert. Im Zentrum dieser Studie steht daher die Lernwirksamkeit einer AR-Lernumgebung zur Förderung des Konzeptverständnisses beim Stoff-Teilchen-Ebenenwechsel. Das Lernsetting richtet sich an (angehende) Lehrkräfte zur Erweiterung ihres Professionswissens mit dem Ziel, innovative digitale Technologien perspektivisch selbst im Fachunterricht didaktisch reflektiert für Schülerinnen und Schülern einsetzen zu können.

Als (angehende) Chemielehrkraft bearbeiten Sie hierfür eine AR- bzw. videogestützte Lernumgebung. Dabei äußern Sie bei der Bearbeitung von Aufgaben, die Ihnen die Lernumgebung stellt, laut Ihre Gedanken. Zusätzlich zur Bearbeitung der AR-Lernumgebung tragen Sie eine Eye-Tracking-Brille, die Ihre Blickbewegungen aufzeichnet. Vor und nach der Bearbeitung füllen Sie einen digitalen Fragebogen aus und geben Ihre Einstellungen und Selbstwirksamkeitserwartungen ab. Zudem elaborieren Sie per lautem Denken fünf Aufgaben zum Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis.

Wie ist der Ablauf der Studie?

Ihre Teilnahme an der Studie ist nach einem einzigen Termin beendet. Die Datenerhebung erfolgt über zwei digitale Fragebögen und die Aufzeichnung Ihrer Arbeit mit der AR-Lernumgebung. Die Fragebögen umfassen Fragen zu Ihren Einstellungen und Selbstwirksamkeitserwartungen in Bezug auf den Chemieunterricht mit digitalen Medien und Augmented Reality. Zusätzlich werden darüber hinaus im ersten Fragebogen organisatorische und demografische Daten (Geschlecht, Alter, Unterrichtsfächer, Erfahrungen mit digitalen Medien und AR oder schulische Faktoren) abgefragt. Mit den offenen Testaufgaben fokussieren wir das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis und die chemische Fachsprache vor dem Hintergrund der Arbeit in einer augmentierten Lernumgebung.

Während der Studie ist *ein* persönlicher Besuch an der TUM vorgesehen. Sie erhalten vor und nach dem Besuch jeweils einen digitalen Fragebogen (1x 80 min, 1x 60 min). Dieser Fragebogen schließt neben der Beantwortung Ihrer Einstellungen und Selbstwirksamkeitserwartungen zu digitalen Medien und Augmented Reality auch die fünf Aufgaben zum Stoff-Teilchen-Konzept, die laut elaboriert werden, ein. Die Beantwortung der Fragen und Aufnahme der Tonspuren erfolgt digital über den Server Unipark (Questback). Es liegt demzufolge eine Datenübermittlung an den Server Unipark (Questback) vor. Unipark (Questback) verarbeitet personenbezogene Daten im Auftrag des Kunden und gewährleistet daher, geeignete technische und organisatorische Maßnahmen zu treffen, damit die Verarbeitung im Einklang mit den An-

forderungen der DSGVO erfolgt und den Schutz der Rechte der betroffenen Personen gewährleistet. Ferner wird während der gesamten Erhebung von einer Speicherung Ihrer IP-Adressen auf der Erhebungsplattform Unipark (Questback) abgesehen.

Die Arbeit mit der digitalen Lernumgebung findet in den Laborräumlichkeiten der TUM, Forschungszentrum Garching, unter Einhaltung der Corona-Hygieneregeln statt (ca. 60 min). Die Tonspuren während der Elaboration in der AR-Lernumgebung werden mithilfe von Kamera und Audio-Software (z.B. Voice Record Pro) mit einem Tablet oder vergleichbarer Technik aufgezeichnet. Während der Bearbeitung der AR-Lernumgebung werden zusätzlich Ihre Blickbewegungen mithilfe einer Eye-Tracking-Brille erfasst.

Sollten Sie noch Fragen zu Ihrer Befragung haben, wenden Sie sich gerne jederzeit an die Studienleitung (melanie.ripsam@tum.de, 089 289 25105).

Welchen Nutzen haben Sie von der Teilnahme an der Studie?

Die Teilnehmer arbeiten mit einer AR- bzw. videogestützten Lernumgebung für das Fach Chemie und lernen auf diese Weise digitale Innovationen für das Schulfach Chemie kennen. Sie untersuchen die Funktionen von Augmented Reality und diskutieren den Mehrwert für den Chemieunterricht. Sie vergleichen die schulischen Einsatzmöglichkeiten dieses digitalen Werkzeugs. Dabei erweitern sie ihre technischen, medienpädagogischen, medienpsychologischen und mediendidaktischen Fähigkeiten und Fertigkeiten mit Bezug zum Unterrichtsfach Chemie am Beispiel Augmented Reality.

Allerdings ist es auch möglich, dass Sie keinen direkten Nutzen aus der Teilnahme haben. Jedoch können die Studienergebnisse perspektivisch für andere Personen hilfreich sein.

Welche Risiken sind mit einer Teilnahme an der Studie für Sie verbunden?

Die Teilnahme an der Studie ist für Sie mit keinen Risiken verbunden.

Was wird von Ihnen erwartet?

Zum Fragebogen:

Bitte machen Sie wahrheitsgemäße Angaben. Entscheiden Sie Ihre Antwort möglichst spontan, sodass Ihre unmittelbare Einschätzung ("Trifft gar nicht zu" bis "Trifft völlig zu") zum Tragen kommt. Bitte kreuzen Sie immer nur eine Antwort an, auch wenn Sie bei der Einschätzung zu einem Begriffspaar unsicher sind.

Zu den offenen Aufgaben und der Arbeit in der AR-Lernumgebung:

Denken Sie stets daran Ihre Gedankengänge vor dem Hintergrund der chemischen Fachsprache und des Stoff-Teilchen-Ebenenwechsels laut zu äußern.

Können Sie im Verlauf aus der Studie ausscheiden?

Die Teilnahme an der Studie ist freiwillig. Sie können jederzeit von der Beantwortung einzelner Fragen absehen. Sie können jederzeit und ohne Angabe von Gründen die Teilnahme an dieser Studie beenden, ohne dass Ihnen daraus Nachteile entstehen.

Zur Gewährleistung des Widerrufsrechts können Sie Ihre Einwilligung zur Speicherung der Daten bis zum Ende der Datenerhebung unter Nennung des Codes widerrufen. Nach Zusammenführung der Daten der beiden Testungen und der anschließenden Löschung des Codes ist allerdings eine Löschung der Daten nicht mehr möglich. Auskunftsanfragen oder ein Widerruf der Einwilligung (führt zur Löschung der pseudonymisierten Daten) können schriftlich an die Versuchsleitung (oder alternativ an den oben angegebenen Ansprechpartner) dieses Projekts gerichtet werden. Ergänzend weisen wir darauf hin, dass durch einen Widerruf der Einwilligung bzw. Antrag auf Löschung der Daten die Rechtmäßigkeit der Verarbeitung der Daten bis zum Zeitpunkt des Widerrufs unberührt bleibt. Die Projektleitung der Studie trägt dafür Sorge, dass die Löschung von Daten auf Antrag sowie deren Anonymisierung den Richtlinien und Verfahrensweisen der aktuellen Datenschutzgrundverordnung (DSGVO) entsprechen.

Vor Beginn der Studie werden Einwilligungserklärungen von den Probanden gemäß Art. 6 Abs. 1a DSGVO und Art. 9 Abs. 2a DSGVO eingeholt. Es wird darauf hingewiesen, dass vorliegend auch besondere Kategorien personenbezogener Daten in Form von Video- und Tonaufnahmen verarbeitet werden. Die Lehrkräfte werden ausdrücklich auf die streng vertrauliche und pseudonymisierte Verarbeitung und Speicherung des Datenmaterials, der Testfragebögen, Blickaufzeichnungen sowie Ton- und Videospuren, hingewiesen. Es besteht bei jeder Frage die Möglichkeit, keine Antwort zu geben. Die Bearbeitung der Befragung kann jederzeit ohne Angabe von Gründen abgebrochen werden.

Information zum Datenschutz

In dieser Studie ist die Technische Universität München datenschutzrechtlich verantwortliche Stelle. Melanie Ripsam und Prof. Dr. Claudia Nerdel fungieren als Ansprechpartner dieser Stelle. Rechtsgrundlage für die Verarbeitung Ihrer Daten ist Ihre Einwilligung. Ihre Daten werden ausschließlich zum Zweck dieser Studie erhoben und nur im Rahmen dieser Studie verwendet. Die Erhebung wird pseudonymisiert durchgeführt. Hierfür wird Ihr Name durch ein Pseudonym (einen Code, bestehend aus mehrstelligen Buchstaben- oder Zahlenkombinationen) generiert: Letzter Buchstabe des ersten Vornamens des Vaters, dem ersten Buchstaben des Vornamens der Mutter und dem Geburtstag des Vaters; Beispiel: Vorname Vater Maximilian, Vorname Mutter Barbara, Geburtstag des Vaters 01.05.1955. Code: NB01). Der Code ermöglicht es uns, Daten von verschiedenen Messzeitpunkten zu verknüpfen, ohne Ihre Iden-

tität zu kennen. Aus dem Code können jedoch die Angaben zu Ihrem Namen nicht wiederhergestellt werden. Dieser Code wird getrennt von den Studiendaten aufbewahrt und lediglich für die Verknüpfung der verschiedenen erhobenen Fragebogendaten genutzt. Im Anschluss erfolgt durch die Zusammenführung der Datensätze, samt Löschung des Individualcodes, eine Anonymisierung der (zuerst pseudonymen) Daten. Folglich werden alle Daten, durch die Sie unmittelbar identifiziert werden könnten, z.B. Ihr Name, nach Zuordnung der Datensätze zueinander gelöscht bzw. so verändert, dass niemand, auch nicht die Studienleitung der TUM, herausfinden kann, zu wem die Daten gehören (Anonymisierung).

Angaben von Ihnen als Einzelperson sind zu keinem Zeitpunkt von Interesse. Die Auswertung der Daten und die Aufbereitung der Ergebnisse erfolgen ausschließlich in zusammengefasster Form (z. B. in Form von Mittelwerten, Prozentangaben etc.), sodass keine Rückschlüsse auf einzelne Personen möglich sind.

Dritten, dazu zählen auch weitere Lehrkräfte und der Schulleitung, wird kein Einblick in die erhobenen Daten gewährt.

Die Datenerhebung beschränkt sich auf die notwendigen Informationen. Die Daten werden ausschließlich für die genannten wissenschaftlichen Zwecke erhoben und nicht auf andere Art und Weise weiterverarbeitet.

Die Erhebung Ihrer oben beschriebenen persönlichen Daten erfolgt für die Fragebögen pseudonymisiert unter Verwendung des Codes. Nach der gesamten Erhebung werden alle Ihre Daten aus den Fragebögen anhand des Codes zusammengeführt. Danach wird der Code gelöscht. Die so anonymisierten Daten werden mindestens 10 Jahre gespeichert. Nur solange die Codes noch nicht gelöscht wurden, können Sie die Löschung der von Ihnen erhobenen Daten, bis ca. Ende Mai 2022, verlangen. Zu diesem Zweck bitten wir Sie sich ihren persönlichen Code zu notieren und aufzubewahren. Alle erhobenen Daten werden auf einem lokalen Server der Technischen Universität München zugriffsgeschützt gespeichert. Alle Personen, die sich mit den Daten befassen, werden über das Datengeheimnis (Art. 5 Bayerisches Datenschutzgesetz, § 5 BDSG Bundesdatenschutzgesetz) belehrt und zu seiner Einhaltung per Unterschrift verpflichtet.

Sämtliche personenbezogene Daten, die zu unter Hinzunahme weiterer Informationen zur Identifizierung Ihrer Person führen könnten, werden nach Abschluss der Auswertung vollständig und unwiderruflich gelöscht, jedoch spätestens 10 Jahre nach Ende der Erhebung. Ihre personenbezogenen Daten werden von den Servern der Fa. Questback GmbH (Unipark) bis spätestens Mai 2022 gelöscht. Die vollständig anonymisierten Fragebogendaten werden zu Forschungszwecken weiterverwendet. Dazu werden sie über eine Internet-Datenbank öffentlich zugänglich gemacht. Mit Ihrer Teilnahme an der Studie leisten Sie einen wichtigen Beitrag

zur Wirksamkeit innovativer Technologien wie Augmented Reality für den Chemieunterricht. Sollten Sie noch Fragen haben, können Sie sich jederzeit an die unten angegebene Email-Adresse wenden.

Die Einwilligung zur Verarbeitung Ihrer Daten ist freiwillig. Sie können jederzeit die Einwilligung ohne Angabe von Gründen und ohne Nachteile für Sie widerrufen. Sie haben das Recht, Auskunft über die Sie betreffenden Daten zu erhalten, auch in Form einer unentgeltlichen Kopie. Darüber hinaus können Sie die Berichtigung oder Löschung Ihrer Daten verlangen.

Wenden Sie sich in diesen Fällen an:

Melanie Ripsam oder Prof. Dr. Claudia Nerdel TUM School of Education, Postanschrift: Arcisstr. 21, 80333 München; Besucheranschrift: Marsstr. 20 80335 München

E-Mail: melanie.ripsam@tum.de oder claudia.nerdel@tum.de

Bei Rückfragen zum Datenschutz wenden Sie sich bitte an den Datenschutzbeauftragten:

Datenschutzbeauftragter der TU München

Herr Baumgarten, Uwe, Prof. Dr.

Technische Universität München

Arcisstr. 21

80333 München

E-Mail: beauftragter@datenschutz.tum.de

Sie haben ebenfalls das Recht, sich bei der Aufsichtsbehörde zu beschweren. Wenden Sie sich an:

Bayerischer Landesbeauftragter für den Datenschutz

Postanschrift: Postfach 22 12 19, 80502 München

Hausanschrift: Wagmüllerstr. 18, 80538 München

E-Mail: poststelle@datenschutz-bayern.de

Vielen Dank für Ihre Unterstützung!

Probandeninformation und Einwilligungserklärung zum Forschungsvorhaben: Wirksamkeit von Augmented Reality (AR) zur Förderung des Stoff-Teilchen-Konzeptverständnisses in der Lehrerbildung und –fortbildung

Einwilligung zur Teilnahme und Datenverarbeitung

- Für Ihre Unterlagen -

Ich wurde *schriftlich* von der Studienleitung Melanie Ripsam über das Projekt und den Versuchsablauf aufgeklärt worden. Ich willige freiwillig in die Erhebung und Verarbeitung meiner personenbezogenen Daten ein. Meine Einwilligung umfasst insbesondere auch die Verarbeitung besonderer Kategorien personenbezogener Daten in Form von Video- und Tonaufnahmen. Ich bin ausreichend informiert worden und hatte die Möglichkeit, Fragen zu stellen. Über die Folgen eines Widerrufs der datenschutzrechtlichen Einwilligung bin ich aufgeklärt worden. Die schriftliche Aufklärung und Einwilligung habe ich erhalten. Sofern ich Fragen zu dieser vorgesehenen Studie hatte, wurden sie von der Versuchsleitung vollständig und zu meiner Zufriedenheit beantwortet.

Mit der beschriebenen Erhebung und Verarbeitung der Daten bin ich einverstanden. Die Aufzeichnung und Erhebung der Daten erfolgen im Projekt unter Verwendung eines generierten Codes ohne Angabe meines Namens. Ich kann unter Angabe des Codes ggfs. mein Widerrufsrecht gemäß DSGVO wahrnehmen. Meine Daten werden nach den in der Teilnehmerinformation beschriebenen Fristen anonymisiert. Damit ist es niemandem mehr möglich, die erhobenen Daten mit meinem Namen in Verbindung zu bringen. Mein Einverständnis zur Aufbewahrung bzw. Speicherung meiner Daten kann ich jederzeit widerrufen, ohne dass mir daraus Nachteile entstehen. Ich kann jederzeit eine Löschung all meiner Daten verlangen, sofern diese noch nicht anonymisiert (bis ca. Ende Mai 2022) wurden. Ich bin einverstanden, dass meine vollständig anonymisierten Fragebogendaten zu Forschungszwecken weiterverwendet werden können. Dazu werden sie über eine Internet-Datenbank öffentlich zugänglich gemacht.

Ich hatte genügend Zeit für eine Entscheidung und bin bereit, an der o.g. Studie teilzunehmen. Ich weiß, dass die Teilnahme an der Studie freiwillig ist und ich die Teilnahme jederzeit ohne Angaben von Gründen beenden kann. Dadurch entstehen keinerlei negative Konsequenzen.

Eine Ausfertigung der Teilnehmerinformation über die Untersuchung und eine Ausfertigung der Einwilligungserklärung habe ich erhalten. Die Teilnehmerinformation bzw. das Informationsschreiben ist Teil dieser Einwilligungserklärung.

Ich willige hiermit in die Teilnahme an der oben genannten Studie und die beschriebene Verarbeitung meiner personenbezogenen Daten ein.

Name der Lehrkraft in Druckbuchstaben

Ort, Datum

Unterschrift der Lehrkraft

Name der Versuchsleitung Melanie Ripsam in Druckbuchstaben

Ort, Datum

Unterschrift der Versuchsleitung Melanie Ripsam

Anhang

Datenschutzhinweise im Zusammenhang mit:

Datenerhebung im Rahmen von DFG-geförderten Projekten, Datenverarbeitung zu wissenschaftlichen Forschungszwecken

Verantwortlich für die Datenerhebung:

Technische Universität München mit den Ansprechpartnern:

Melanie Ripsam, Professur für Fachdidaktik Life Sciences, TUM School of Education, Technische Universität München, Postanschrift: Arcisstr. 21, 80333 München, Besucheranschrift: Marsstr. 20 80335 München, Raum 231, melanie.ripsam@tum.de, Telefon: 089 289 25105

Prof. Dr. Claudia Nerdel, Professur für Fachdidaktik Life Sciences, TUM School of Education, Postanschrift: Arcisstr. 21, 80333 München, Besucheranschrift: Marsstr. 20 80335 München, Raum 234, claudia.nerdel@tum.de, Telefon: 089 289 25377

Dienstliche Anschrift, E-Mail-Adresse und Telefonnummer des behördlichen Datenschutzbeauftragten:

Datenschutzbeauftragter der TU München, Herr Baumgarten, Uwe, Prof. Dr., Technische Universität München, Arcisstr. 21, 80333 München, E-Mail: beauftragter@datenschutz.tum.de

Zwecke der Verarbeitung:

Datenverarbeitung zu wissenschaftlichen Forschungszwecken

Das Projekt untersucht, wie sich Augmented Reality auf das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis und den Umgang mit der chemischen Fachsprache auswirken kann. Es ist das Ziel neue Erkenntnisse für die Lehrerbildung, Schulleitungen und Lehrkräfte zur Verwirklichung digitaler Unterrichtsgestaltungen zu gewinnen.

Rechtsgrundlagen der Verarbeitung:

Ihre Daten werden auf Grundlage von Art. 6 Abs. 1a DSGVO und Art. 9 Abs. 2a DSGVO verarbeitet.

Dauer der Speicherung der personenbezogenen Daten:

Erhobene pseudonymisierte Daten werden spätestens 10 Jahre nach Datenerhebung gelöscht. Vollständig anonymisierte Roh- bzw. Primärdaten der Fragebögen werden nicht gelöscht, um diese auch öffentlich zugänglich machen zu können. Die vollständig anonymisierten Fragebogendaten dieser Studie werden als offene Daten im Internet in einem sicheren, internetbasierten Datenarchiv zugänglich gemacht. Damit folgt diese Studie den Empfehlungen der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) und der Deutschen Gesellschaft für Psychologie (DGPs) zur Qualitätssicherung in der Forschung.

Betroffenenrechte:

Nach der Datenschutz-Grundverordnung stehen Ihnen folgende Rechte zu: Werden Ihre personenbezogenen Daten verarbeitet, so haben Sie das Recht Auskunft über die zu Ihrer Person gespeicherten Daten zu erhalten (Art. 15 DSGVO). Sollten unrichtige personenbezogene Daten verarbeitet werden, steht Ihnen ein Recht auf Berichtigung zu (Art. 16 DSGVO).

Liegen die gesetzlichen Voraussetzungen vor, so können Sie die Löschung oder Einschränkung der Verarbeitung verlangen sowie Widerspruch gegen die Verarbeitung einlegen (Art. 17, 18 und 21 DSGVO). Wenn Sie in die Datenverarbeitung eingewilligt haben oder ein Vertrag zur Datenverarbeitung besteht und die Datenverarbeitung mithilfe automatisierter Verfahren durchgeführt wird, steht Ihnen gegebenenfalls ein Recht auf Datenübertragbarkeit zu (Art. 20 DSGVO). Sollten Sie von Ihren oben genannten Rechten Gebrauch machen, prüft die öffentliche Stelle, ob die gesetzlichen Voraussetzungen hierfür erfüllt sind.

Weiterhin besteht ein Beschwerderecht beim Bayerischen Landesbeauftragten für den Datenschutz:

Bayerischer Landesbeauftragte für den Datenschutz Prof. Dr. Thomas Petri Postfach 221219, 80502 München Wagmüllerstraße 18, 80538 München Tel.: 089 / 212672 – 0 Fax: 089 /

212672 – 50 Email: poststelle@datenschutz-bayern.de web: <https://www.datenschutz-bayern.de/vorstell/impressum.html>

Möchten Sie eines dieser Rechte in Anspruch nehmen, wenden Sie sich bitte an die Versuchsleitung bzw. an die Projektleitung Prof. Dr. Claudia Nerdel oder Melanie Ripsam.

Widerrufsrecht bei Einwilligung:

Wenn Sie in die Verarbeitung durch die TUM durch eine entsprechende Erklärung eingewilligt haben, können Sie die Einwilligung jederzeit für die Zukunft widerrufen. Die Rechtmäßigkeit der aufgrund der Einwilligung bis zum Widerruf erfolgten Datenverarbeitung wird durch diesen nicht berührt.

Probandeninformation und Einwilligungserklärung zum Forschungsvorhaben: Wirksamkeit von Augmented Reality (AR) zur Förderung des Stoff-Teilchen-Konzeptverständnisses in der Lehrerbildung und –fortbildung

Einwilligung zur Teilnahme und Datenverarbeitung

- Bitte an der Schule bei der Schulleitung aufbewahren -

Ich wurde *schriftlich* von der Studienleitung Melanie Ripsam über das Projekt und den Versuchsablauf aufgeklärt worden. Ich willige freiwillig in die Erhebung und Verarbeitung meiner personenbezogenen Daten ein. Meine Einwilligung umfasst insbesondere auch die Verarbeitung besonderer Kategorien personenbezogener Daten in Form von Video- und Tonaufnahmen. Ich bin ausreichend informiert worden und hatte die Möglichkeit, Fragen zu stellen. Über die Folgen eines Widerrufs der datenschutzrechtlichen Einwilligung bin ich aufgeklärt worden. Die schriftliche Aufklärung und Einwilligung habe ich erhalten. Sofern ich Fragen zu dieser vorgesehenen Studie hatte, wurden sie von der Versuchsleitung vollständig und zu meiner Zufriedenheit beantwortet.

Mit der beschriebenen Erhebung und Verarbeitung der Daten bin ich einverstanden. Die Aufzeichnung und Erhebung der Daten erfolgen im Projekt unter Verwendung eines generierten Codes ohne Angabe meines Namens. Ich kann unter Angabe des Codes ggf. mein Widerrufsrecht gemäß DSGVO wahrnehmen. Meine Daten werden nach den in der Teilnehmerinformation beschriebenen Fristen anonymisiert. Damit ist es niemandem mehr möglich, die erhobenen Daten mit meinem Namen in Verbindung zu bringen. Mein Einverständnis zur Aufbewahrung bzw. Speicherung meiner Daten kann ich jederzeit widerrufen, ohne dass mir daraus Nachteile entstehen. Ich kann jederzeit eine Löschung all meiner Daten verlangen, sofern diese noch

nicht anonymisiert (bis ca. Ende Mai 2022) wurden. Ich bin einverstanden, dass meine vollständig anonymisierten Fragebogendaten zu Forschungszwecken weiterverwendet werden können. Dazu werden sie über eine Internet-Datenbank öffentlich zugänglich gemacht.

Ich hatte genügend Zeit für eine Entscheidung und bin bereit, an der o.g. Studie teilzunehmen. Ich weiß, dass die Teilnahme an der Studie freiwillig ist und ich die Teilnahme jederzeit ohne Angaben von Gründen beenden kann. Dadurch entstehen keinerlei negative Konsequenzen.

Eine Ausfertigung der Teilnehmerinformation über die Untersuchung und eine Ausfertigung der Einwilligungserklärung habe ich erhalten. Die Teilnehmerinformation bzw. das Informationsschreiben ist Teil dieser Einwilligungserklärung.

Ich willige hiermit in die Teilnahme an der oben genannten Studie und die beschriebene Verarbeitung meiner personenbezogenen Daten ein.

Name der Lehrkraft in Druckbuchstaben

Ort, Datum

Unterschrift der Lehrkraft

Name der Versuchsleitung Melanie Ripsam Druckbuchstaben

Ort, Datum

Unterschrift der Versuchsleitung Melanie Ripsam

Die unterschriebene Einwilligungserklärung geben Sie bitte bei Ihrer Schulleitung zum dortigen Verbleib ab. Nach einem Jahr wird Ihre Einwilligungserklärung von der Schulleitung vernichtet.

A.3.1.2 Prätest

Teilnahme an der Studiendurchführung zur Wirksamkeit von AR für den Chemieunterricht

Liebe*r Untersuchungsteilnehmer*in,

ich freue mich, dass Sie an der AR-Studie im Rahmen meines Promotionsprojekts teilnehmen. Die Studie wird von der Professur für Fachdidaktik Life Sciences der TUM School of Social Sciences & Technology unter der Leitung von mir, Melanie Ripsam, und Prof. Dr. Claudia Nerdel durchgeführt. Im Folgenden möchte ich Sie über die Ziele und den Ablauf der Studie informieren:

Studienziel: Das Ziel der Erhebung ist es, die Wirksamkeit von Augmented Reality (AR) zur Förderung des Stoff-Teilchen-Konzeptverständnisses und der chemischen Fachsprache in der Lehrerfortbildung und -weiterbildung zu untersuchen. Zu diesem Zwecke wurde eine AR-Lernumgebung zur Elektrolyse von Zinkiodid für den Chemieunterricht konzipiert. Im Rahmen der Studie sollen Ihre Einstellungen und Selbstwirksamkeitserwartungen zu digitalen Medien und Augmented Reality erhoben werden. Ferner möchte ich Ihren Umgang mit der chemischen Fachsprache und Ihr Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis erfassen. Um zudem Schwachstellen in der App aufzudecken, soll die AR-Lernumgebung abschließend fach- und mediendidaktisch sowie technisch bewertet (Usability) werden.

Weitere Informationen (v.a. zum Datenschutz usw.) entnehmen Sie der Teilnehmerinformation. Bei Rückfragen wenden Sie sich an die Projektleitung. Vielen Dank für Ihre Teilnahme ☺ Sie leisten einen wichtigen Beitrag zur Weiterentwicklung digitaler Unterrichtskonzepte für den Chemieunterricht.

Sie haben bereits den digitalen Fragebogen ausgefüllt. Bevor wir zur Testung der AR-App übergehen, bitte ich Sie folgenden Pretest mit insgesamt 5 Testaufgaben per lautem Denken zu bearbeiten:

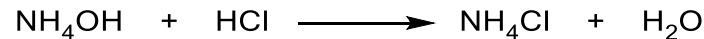
Testaufgabe 1

Bei der Reaktion von Metallen mit Nichtmetallen entstehen durch Elektronenübergänge Salze, die aus Kationen und Anionen bestehen. Ein typischer Vertreter einer solchen Synthesereaktion ist das Natriumchlorid, auch Kochsalz genannt. Das Salz hat völlig andere Eigenschaften als die Elemente Natrium mit der Ordnungszahl 11 und Chlor mit der Ordnungszahl 17.

Skizzieren Sie die chemischen Vorgänge bei der Synthese von Natriumchlorid aus seinen Elementen an einem geeigneten Modell Ihrer Wahl. Erklären Sie die chemischen Hintergründe bei der Synthese und beschreiben Sie die Grenzen des verwendeten Modells. Achten Sie auf eine geeignete chemische Fachsprache. Differenzieren Sie in Ihren Beschreibungen und Erläuterungen explizit zwischen Stoff- und Teilchenebene.

Testaufgabe 2

Szenario: Als Chemielehrkraft thematisieren Sie *Säuren und Basen* (Hinweis: Die Jahrgangsstufe ist abhängig von Ihrem Standort und dem Lehrplan). Erklären Sie mithilfe der gegebenen Reaktionsgleichung (s.u. Kasten) die Bedeutung von *Neutralisationsreaktionen*. Erläutern Sie die chemischen Hintergründe der Reaktion unter Rücksichtnahme der chemischen Fachsprache. Differenzieren Sie in Ihren Beschreibungen und Erläuterungen explizit zwischen Stoff- und Teilchenebene.

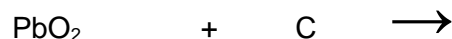
**Testaufgabe 3**

Galvanisieren ist das elektrolytische Überziehen von (meist) unedlen Metallen mit haftenden (edleren) Metallüberzügen. Auf diese Weise können Metalle vor Korrosion geschützt werden. Je nachdem, welches Metall als Überzug verwendet wird, spricht man von Vernickelung, Verchromung usw. Durch Anlegen einer elektrischen Spannung gehen die Atome des Überzugsmetalls als Ionen in Lösung und scheiden sich am unedleren Metall ab.

Skizzieren Sie einen Versuchsaufbau zum Verchromen eines Eisenschlüssels (Hinweis: Chrom(III)-sulfat). Erklären Sie die chemischen Hintergründe der Galvanisierung unter Zuhilfenahme geeigneter Repräsentationsformen. Achten Sie auf eine geeignete chemische Fachsprache. Differenzieren Sie in Ihren Beschreibungen und Erläuterungen explizit zwischen Stoff- und Teilchenebene.

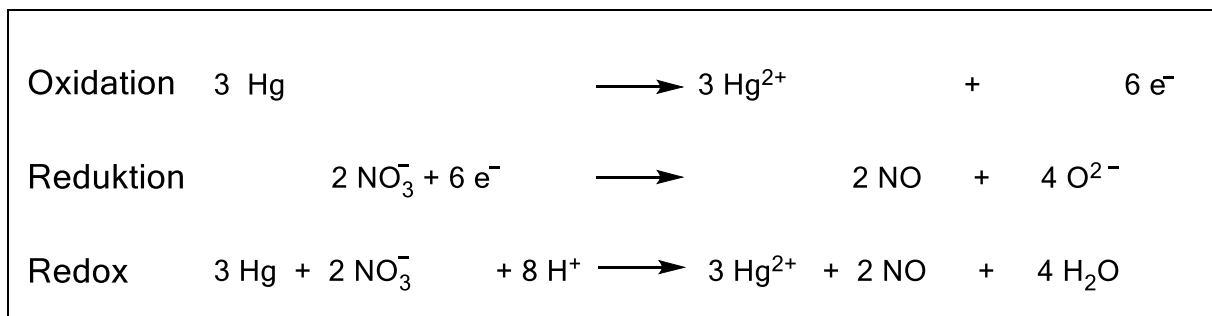
Testaufgabe 4

Formulieren Sie für die Gewinnung von Blei (Nebenprodukt: Kohlenstoffdioxid) die einzelnen Teilgleichungen, Reduktion und Oxidation, sowie die Gesamtgleichung unter Angabe der Oxidationsstufen. Vervollständigen Sie hierfür den angeführten Kasten und schildern Sie Ihr Vorgehen bei der Aufgabenbearbeitung. Gehen Sie auf Besonderheiten beim Aufstellen von Redoxreaktionen ein und erklären Sie die chemischen Hintergründe. Achten Sie auf eine geeignete chemische Fachsprache. Differenzieren Sie in Ihren Beschreibungen und Erläuterungen explizit zwischen Stoff- und Teilchenebene.



Testaufgabe 5

Es ist eine Gesamtgleichung mit ihren Teilgleichungen gegeben:



Schritt 1: Paraphrasieren Sie in eigenen Worten die im Kasten angeführten Teil- und Gesamtgleichungen.

Schritt 2: Die folgenden Aussagen a) bis f) sollen die angeführten chemischen (Teil-) Reaktionen beschreiben. Die verschiedenen Lösungen stützen sich auf gängige Schülervorstellungen. Diskutieren Sie alle der angeführten Aussagen vor dem Hintergrund der chemischen Fachsprache und der Stoff- sowie Teilchenebenen. Bewerten Sie die Schülervorstellungen, die sich in den Aussagen widerfinden, aus fachlicher Perspektive und nennen Sie gegebenenfalls Verbesserungsvorschläge.

- a) Bei der Reduktion von farbloser, flüssiger Salpetersäure entsteht farbloses, gasförmiges Stickstoffmonoxid.
- b) Bei der Reduktion von Nitrat (NO_3^-) entsteht das farb- und geruchslose, giftige Gas NO.
- c) Das silbrig-glänzende Schwermetall Quecksilber Hg wird als Reduktionsmittel zu drei zweifach positiv-geladenen Quecksilberionen oxidiert.
- d) Drei Quecksilberatome (3 Hg) werden als Oxidationsmittel zu aquatisierten Quecksilberionen (Hg^{2+}) oxidiert.
- e) Bei der Reduktion von Nitrat (NO_3^-) und der damit einhergehenden Oxidation von Quecksilber entstehen Quecksilber (II)-Ionen, molekulares NO und Wasser.
- f) Das silbrig-glänzende Schwermetall Quecksilber wird durch Abgabe von sechs Elektronen reduziert. Es liegen sodann Quecksilberionen in Wasser und oxidiertes Stickstoffmonoxid vor.

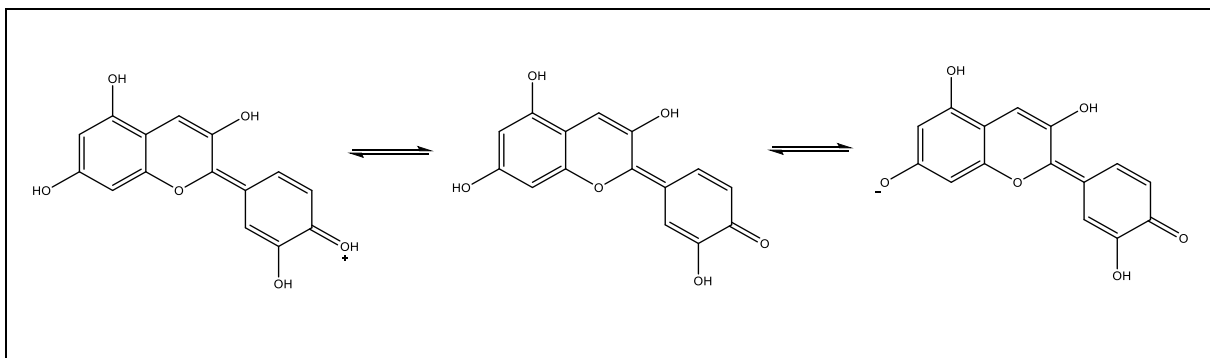
A.3.1.3 Posttest

Nachdem Sie die AR-App getestet und bewertet haben, bitte ich Sie abschließend den folgenden Posttest mit fünf Testaufgaben aus der Chemie per lautem Denken zu elaborieren:

Posttest

Testaufgabe 1

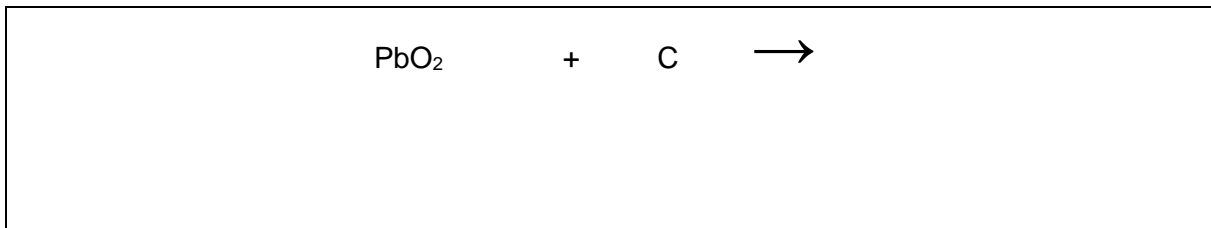
In Norddeutschland gibt man einem Gemüse, welches meist in der Natur eine violette Farbe aufzeigt, den Namen Rotkohl. In Süddeutschland hingegen nennt man es Blaukraut. Wohingegen der Kohl in nördlichen Teilen Deutschlands mit Äpfel, Essig oder Wein angesäuert wird, gibt man im Süden beim Kochen Zucker und Natron hinzu. Demnach ändert sich abhängig von der Zubereitungsart die Farbe des Gemüses. Der im Rotkohl/Blaukraut enthaltene Farbstoff nennt sich Cyanidin. Folgende chemische Strukturformeln können für die Erklärung der unterschiedlichen Farbe des Gemüses herangezogen werden:



Erklären Sie mithilfe der Abbildung die Farben des Kohls. Achten Sie auf eine geeignete chemische Fachsprache. Differenzieren Sie in Ihren Beschreibungen und Erläuterungen explizit zwischen Stoff- und Teilchenebene.

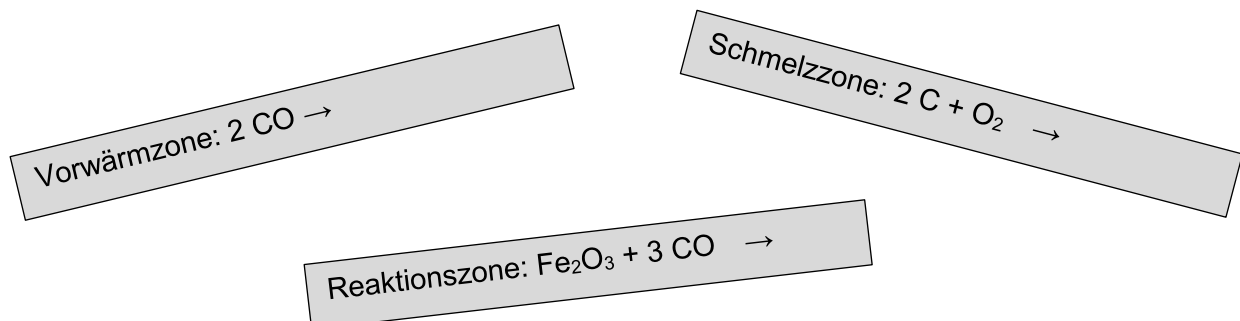
Testaufgabe 2

Formulieren Sie für die Gewinnung von Blei (Nebenprodukt: Kohlenstoffdioxid) die einzelnen Teilgleichungen, Reduktion und Oxidation, sowie die Gesamtgleichung unter Angabe der Oxidationsstufen. Vervollständigen Sie hierfür den angeführten Kasten und schildern Sie Ihr Vorgehen bei der Aufgabenbearbeitung. Gehen Sie auf Besonderheiten beim Aufstellen von Redoxreaktionen ein und erklären Sie die chemischen Hintergründe. Achten Sie auf eine geeignete chemische Fachsprache. Differenzieren Sie in Ihren Beschreibungen und Erläuterungen explizit zwischen Stoff- und Teilchenebene.

**Testaufgabe 3**

In modernen Industriegesellschaften spielt Stahl eine wichtige Rolle. Bei Stahl handelt es sich um Eisen, das mit anderen Stoffen verbunden ist. Das Eisen für die Stahlproduktion wird mithilfe von Redoxreaktionen in Hochofen gewonnen. Ein Hochofen ist ein schachtförmiges Bauwerk, das nach dem Gegenstromprinzip arbeitet: Grobkörniges Eisenerz, Koks und Zusatzstoffe werden von oben in den Hochofen eingefüllt, während die Gase von unten nach oben strömen und als *Gichtgas* den Hochofen verlassen.

Vervollständigen Sie die Reaktionsgleichungen in den Kästen und fertigen Sie eine Skizze zur Herstellung von Eisen im Hochofen an. Erklären Sie mithilfe der angeführten Informationen zu den Hochofenprozessen die Herstellung von Eisen. Erläutern Sie in diesem Zusammenhang die chemischen Hintergründe von Redoxreaktionen. Achten Sie auf eine geeignete chemische Fachsprache. Differenzieren Sie in Ihren Beschreibungen und Erläuterungen explizit zwischen Stoff- und Teilchenebene.



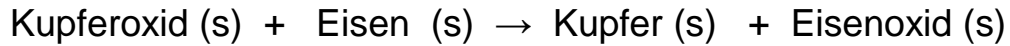
Testaufgabe 4

Galvanisieren ist das elektrolytische Überziehen von (meist) unedlen Metallen mit haftenden (edleren) Metallüberzügen. Auf diese Weise können Metalle vor Korrosion geschützt werden. Je nachdem, welches Metall als Überzug verwendet wird, spricht man von Vernickelung, Verchromung usw. Durch Anlegen einer elektrischen Spannung gehen die Atome des Überzugsmetalls als Ionen in Lösung und scheiden sich am unedleren Metall ab.

Skizzieren Sie einen Versuchsaufbau zum Verchromen eines Eisenschlüssels (Hinweis: Chrom(III)-sulfat). Erklären Sie die chemischen Hintergründe der Galvanisierung unter Zuhilfenahme geeigneter Repräsentationsformen. Achten Sie auf eine geeignete chemische Fachsprache. Differenzieren Sie in Ihren Beschreibungen und Erläuterungen explizit zwischen Stoff- und Teilchenebene.

Testaufgabe 5

Gegeben sei eine Redoxreaktion:



Schritt 1: Paraphrasieren Sie in eigenen Worten die im Kasten angeführte chemische Reaktion.

Schritt 2: Die folgenden Aussagen a) bis f) sollen die im Kasten angeführte chemische Reaktion beschreiben. Die verschiedenen Lösungen stützen sich zum Teil auf gängige Schülervorstellungen. Diskutieren Sie alle der angeführten Aussagen vor dem Hintergrund der chemischen Fachsprache und der Stoff- sowie Teilchenebenen. Bewerten Sie die Schülervorstellungen, die sich in den Aussagen widerfinden, aus fachlicher Perspektive und nennen Sie gegebenenfalls Verbesserungsvorschläge.

- Bei der Reduktion von Kupferoxid und der Oxidation von Eisen erhält man als Produkt Eisenoxid mit roten Kupferkügelchen.
- Bei der gegebenen Redoxreaktion wird das Sauerstoffatom von Kupferoxid auf das Eisen übertragen. Es handelt sich um einen Sauerstoffaustausch mit O_2 - Molekülen.
- Bei der Reduktion der Kupfer-Ionen und der Oxidation von festem Eisen entsteht elementares Kupfer und FeO .
- Bei der Redoxreaktion wird das Oxid-Anion O^{2-} von Kupferoxid CuO auf das Eisen Fe übertragen. Dabei entstehen rote Kupferatome Cu und grauschwarzes Eisenoxid FeO .
- Bei der exothermen Reaktion ist nach Entfernen des Bunsenbrenners noch immer ein Glühen zu beobachten, sodass die Cu^{2+} -Ionen des Kupferoxids zu Cu -Atomen reduziert und das Eisen zu Fe^{2+} -Ionen oxidiert werden.
- Die Redoxreaktion findet ausschließlich zwischen Cu^{2+} - Ionen und Fe - Atomen durch eine Übertragung der Elektronen statt.

A.3.1.4 Musterlösungen des Prätests

Allgemeine Hinweise zu den Testaufgaben aus Prä- und Posttest

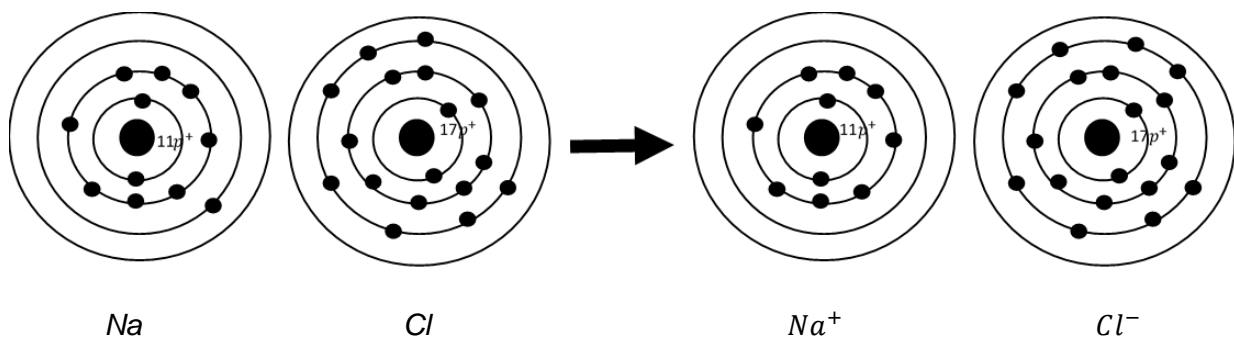
Stoffebene: Die makroskopische Ebene beschreibt reale, beobachtbare Phänomene der materiellen Welt, die wir sehen, riechen und fühlen können.

Teilchenebene: Die submikroskopische Ebene fokussiert Partikel (z.B. Atome, Ionen, chemische oder physikalische Prozesse). Mit ihr kann die stoffliche Welt erklärt werden.

Testaufgabe 1

Skizzieren Sie die chemischen Vorgänge bei der Synthese von Natriumchlorid aus seinen Elementen an einem geeigneten Modell Ihrer Wahl.

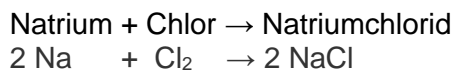
Schalenmodell nach Bohr (Alternativ: Kugelwolkenmodell):



Erklären Sie die chemischen Hintergründe bei der Synthese und beschreiben Sie die Grenzen des verwendeten Modells.

Teilchenebene: Mit dem Schalenmodell lassen sich die chemischen Hintergründe der Synthese erklären. Es handelt sich um eine Elektronenübertragung (Redoxreaktion): Die Darstellung des Aufbaus von Atomen mit Elektronen in den Schalen zeigt, dass sich die Elektronen einer Schale auf einem Energieniveau befinden und chemisch äquivalent sind. Jedes Atom (sowohl Na-Teilchen als auch Cl-Teilchen) ist bestrebt die stabile Edelgaskonfiguration (Stichwort: Oktett-Regel) zu erreichen. Demnach wird das Valenzelektron des Natriumatoms abgegeben. Auf der äußersten Schale eines Chloratoms befinden sich sieben Valenzelektronen. Das Cl-Teilchen nimmt daher das vom Na-Teilchen abgegebene Elektron auf. In der Folge bilden sich ein einfach positiv geladenes Natrium-Kation Na^+ und ein einfach negatives geladenes Chlorid-Anion Cl^- . Die Folge ist eine ionische Bindung (\rightarrow elektrostatische Wechselwirkung). Mehrere Ionen bilden sodann ein Ionengitter aus.

Allgemeine Gleichung der exothermen Reaktion



Grenzen des Modells (zwei Merkmale reichen!):

Das Bohrsche Atommodell als Denkmodell...

- zeigt nicht den tatsächlichen Aufenthalt der Elektronen in Orbitalen (räumliche Ausdehnung) und die tatsächliche Bewegung der Elektronen auf
- ist nur auf das Wasserstoffatom bezogen
- stellt Elektronen, Protonen und Neutronen als greifbare Kugeln (hier: in 2D als Scheiben) dar
- vernachlässigt Elektrodynamik: Elektron müsste als bewegte Ladung elektromagnetische Wellen abstrahlen > Es verliert Energie > Es wird langsamer > Es verlässt Kreisbahn > Es stürzt auf Kern > Widerspruch
- verletzt aufgrund der Vorstellung einer def. Bahn des Elektrons um Atomkern die Unschärferelation
- erklärt nicht die Unregelmäßigkeiten bei den Ionisierungsenergien (s- und p-Sprünge im Diagramm)

Bezug zur Stoffebene: Beschreibung der Versuchsdurchführung zur Synthese von Natriumchlorid denkbar um Stoff- und Teilchenebene voneinander abzugrenzen

Das Salz (bestehend aus Metall-Ionen und aus Nichtmetall-Ionen) kann durch eine direkte Reaktion der beiden Ausgangsstoffe hergestellt werden.



Sehr reaktives, festes Natrium + sehr reaktives Chlorgas \rightarrow weißer Feststoff Natriumchlorid

Grobe Versuchsbeschreibung:

1. Vorbereitende Schritte
2. Man gibt das metallisch glänzende Natriumstück in Reagenzglas mit Loch und erhitzt das Natriumstück mit dem Gasbrenner, bis es schmilzt.
3. Reagenzglas mit dem geschmolzenen Natrium wird in Standzylinder mit gelbgrünen Chlorgas gehängt.

Beobachtung

Sobald das Reagenzglas mit dem geschmolzenen Natrium in das Chlorgas gehängt wird, fängt das Natrium mit gelber Flamme an zu brennen. Es bildet sich ein weißer Nebel, der sich als weißer Feststoff im Reagenzglas niederschlägt.

Ergebnis

Bei der Reaktion entsteht der weiße Feststoff Natriumchlorid

Testaufgabe 2

Erklären Sie mithilfe der gegebenen Reaktionsgleichung (s.u. Kasten) die Bedeutung von Neutralisationsreaktionen.

Stoffebene (Teilchenebene):

Es reagiert (bei einer Neutralisationsreaktion) eine Lauge ($\text{NH}_4\text{OH}_{(l)}$) mit einer Säure ($\text{HCl}_{(aq)}$) unter Bildung von Wasser ($\text{H}_2\text{O}_{(l)}$) zu einem Salz ($\text{NH}_4\text{Cl}_{(aq)}$).

Ammoniakwasser stellt eine Base (Protonenakzeptor) dar, deren pH-Wert größer 7 ist. Die Lösung ist farblos (Moleküle NH_4OH dissoziieren in einer Gleichgewichtsreaktion in Ammonium-Ionen und Hydroxid-Ionen). Wässrige Salzsäure als farblose Lösung ist eine starke Säure (Protonendonator) mit einem PH-Wert kleiner sieben. In der Reaktionsgleichung wird ersichtlich, dass Ammoniakwasser mittels Salzsäure neutralisiert wurde. Es entstehen folglich Wasser und der im Wasser gelöste, kristalline Feststoff Ammoniumchlorid als Produkte. Nach Zusammenführung der Edukte/Neutralisation (Ablauf der Reaktion) liegt per se ein neutraler PH-Wert von 7 vor. Da jedoch Ammoniumchlorid in Wasser gut löslich ist, reagiert die Lösung schwach sauer (Die bei der Dissoziation gebildeten Ammonium-Ionen reagieren mit Wasser als Protonendonatoren).

Auf Teilchenebene (Stoffebene):

Schwerpunkt: Ionenschreibweise (+Hydroxid- und Oxonium-Ionen)

Das Ammonium-Ion NH_4^+ von Ammoniumhydroxid NH_4OH (Ammoniakwasser als wässrige Lösung von Ammoniak) reagiert mit dem Chlorid-Ion Cl^- von Chlorwasserstoff HCl (wässrige Salzsäure) zu Ammoniumchlorid NH_4Cl (Salz). Das Hydroxid-Ion OH^- von Ammoniumchlorid NH_4OH reagiert mit dem Proton H^+ von Chlorwasserstoff HCl zu Dihydrogenoxid H_2O (Wasser). Es folgt die Dissoziation der Produkte NH_4Cl in H_2O .

Mögliche Zusatz-Bezeichnungen:

positivgeladene Teilchen: Kationen

negativgeladene Teilchen: Anionen

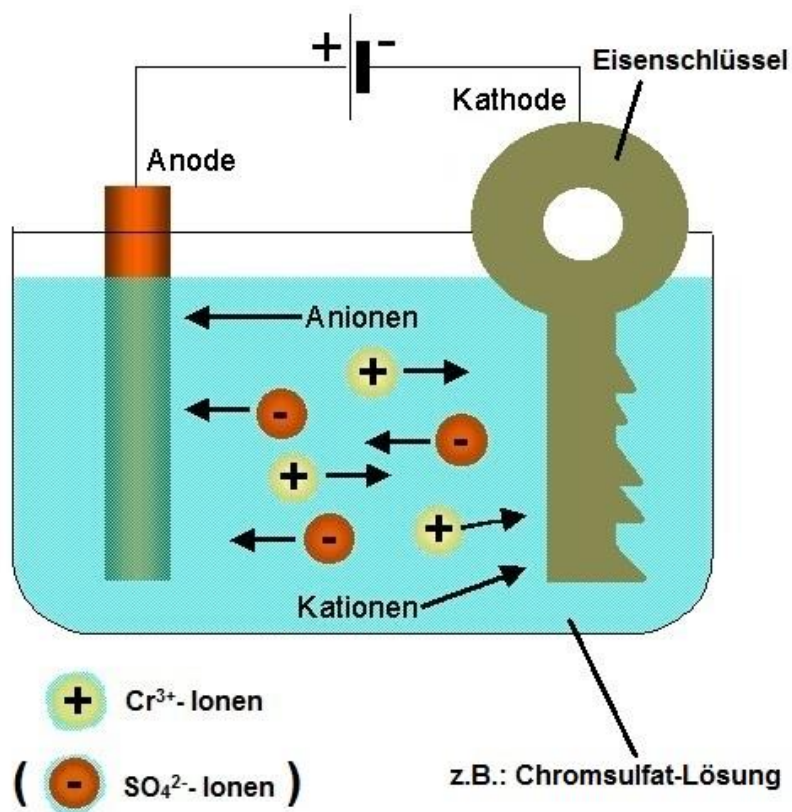
Ammoniakwasser = Salmiakgeist

Testaufgabe 3

Skizzieren Sie einen Versuchsaufbau zum Verchromen eines Eisenschlüssels (Hinweis: Chrom(III)-sulfat).

Auf Stoffebene: Versuchsbeschreibung (Skizze) mit Schlüssel, Elektrolytlösung Anode und Spannungsquelle, Schilderung der Beobachtung (Am Eisennagel scheidet sich eine bläuliche Schicht Chrom ab).

Auf Teilchenebene: Anionen, Kationen und Teilchenbewegungen, Elektronenübergänge (Reduktion und Oxidation)



Anmerkung: Chrom(III)-sulfat ist zum Verchromen eine ungewöhnliche Elektrolytlösung - In der Praxis: Zur elektrochemischen Erzeugung von Chrom-Überzügen taucht man den betreffenden – meist vorher elektrochemisch vernickelten - Gegenstand als Kathode in eine schwefelsaure Lösung von Chrom(VI)-säure. Die Chromschicht haftet auf einer dünnen Nickelschicht wesentlich besser als direkt auf Eisen.

Der Prozess kann mit folgender Gleichung beschrieben werden: $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-} + 14 \text{H}^+ + 12 \text{e}^- \rightarrow 2 \text{Cr} + 7 \text{H}_2\text{O}$

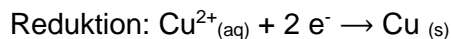
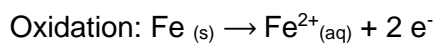
Erklären Sie die chemischen Hintergründe der Galvanisierung unter Zuhilfenahme geeigneter Repräsentationsformen.

Hinweis: Chemische Hintergründe (→ Teilchenebene) zur Erklärung des Metallüberzugs (→ Stoffebene)

Auf Teilchenebene (Text und Symbol als geeignete Repräsentationsform):

Beim Galvanisieren findet ein Elektronenaustausch auf atomarer Dimension – Elektronenübergänge: Oxidation und Reduktion – statt. Das Reduktionsmittel gibt Elektronen ab, die das Oxidationsmittel aufnimmt. Die Oxidations- und Reduktionswirkung eines Stoffes ist eine Funktion des zu oxidierenden bzw. reduzierenden Reaktionspartner.

Bsp. zum Verkupfern: Eisen ist unedler als Kupfer, daher gibt es Elektronen ab. Eisen wird oxidiert und die in der Kupfersulfatlösung enthaltenen Kupfer-Ionen werden zu elementarem Kupfer reduziert. Zwischen Kupfer- und Eisensystem fließt elektrischer Strom → Zwischen beiden Systemen besteht eine Spannung („Potentialdifferenz“). Strom fließt nur aufgrund von „Potential“-Unterschieden (Von höherem zu niedrigerem Niveau). In der Folge scheidet sich (auf Stoffebene) Kupfer am Schlüssel ab.

**Allgemeiner Hinweis**

Herleitung aus Text: Opferelektrode aus Chrom (Stoffebene) liefert auf Teilchenebene Elektronen mittels Oxidation $\text{Cr} \rightarrow \text{Cr}^{3+} + 3 e^{-}$. Es folgt Elektronenaufnahme/Reduktion an der Kathode (Stoffebene: Schlüssel): $\text{Cr}^{3+} + 3 e^{-} \rightarrow \text{Cr}$

Testaufgabe 4

Formulieren Sie für die Gewinnung von Blei (Nebenprodukt: Kohlenstoffdioxid) die einzelnen Teilgleichungen, Reduktion und Oxidation, sowie die Gesamtgleichung unter Angabe der Oxidationsstufen. Vervollständigen Sie hierfür den angeführten Kasten und schildern Sie Ihr Vorgehen bei der Aufgabenbearbeitung. Gehen Sie auf Besonderheiten beim Aufstellen von Redoxreaktionen ein und erklären Sie die chemischen Hintergründe.

$$\begin{array}{ccccccc}
 +\text{IV}-\text{II} & & 0 & & 0 & & +\text{IV}-\text{II} \\
 \text{PbO}_2 & + & \text{C} & \rightarrow & \text{Pb} & + & \text{CO}_2 \\
 \downarrow & & \downarrow & & \uparrow & & \uparrow \\
 & & \text{Oxidation} & & & & \\
 \text{Reduktion} & & & & & &
 \end{array}$$

Reduktion: $\text{PbO}_2 + 4 e^- + 4 \text{H}_3\text{O}^+ \rightarrow \text{Pb} + 6 \text{H}_2\text{O}$

Oxidation: $\text{C} + 6 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 4 e^- + 4 \text{H}_3\text{O}^+$

REDOX: $\text{PbO}_2 + \text{C} \rightarrow \text{Pb} + \text{CO}_2$

Alternativ könnten auch Hydroxid-Ionen (OH^-) für den Ausgleich verwendet werden. Ebenso kann in den Teilgleichungen der Sauerstoff vernachlässigt werden, da dessen Oxidationsstufe sich nicht ändert.

Einfachere Variante:

Reduktion: $\text{Pb}^{4+} + 4 e^- \rightarrow \text{Pb}$

Oxidation: $\text{C} \rightarrow \text{C}^{4+} + 4 e^-$

REDOX: $\text{Pb}^{4+} + \text{C} \rightarrow \text{Pb} + \text{C}^{4+}$

Das Blei(IV)-Ion Pb^{4+} wird durch Aufnahme von vier Elektronen zu Blei Pb reduziert.

Das Kohlenstoff-Atom C wird durch Abgabe von vier Elektronen zu dem Kation C^{4+} oxidiert.

Blei(IV)-Ion Pb^{4+} dient dabei als Oxidationsmittel, wobei der Kohlenstoff C das Reduktionsmittel ist.

Vorgehen beim Aufstellen von Redoxreaktionen:

1. Oxidationsstufen bestimmen

2. Änderungen der Oxidationsstufen auf Teilchenebene betrachten

3. Die Oxidationsstufe von Blei(IV)-Ion Pb^{4+} lautet +4. Die Oxidationsstufe von Blei Pb lautet 0. Es liegt eine Differenz von vier vor, die multipliziert mit dem Indices und Koeffizient der Verbindung die aufgenommenen Elektronen angibt. Ein Pb^{4+} -Teilchen nimmt vier Elektronen auf und wird damit reduziert.

Analoges Vorgehen für die Oxidation (Elektronenabgabe !!!)

4. Aufstellen von Reduktion und Oxidation

- Zuerst die Edukte, Produkte und Elektronenausgleich mit aufgenommenen bzw. abgegebenen Elektronen aufschreiben

- Koeffizientenausgleich

- Ladungsausgleich mithilfe von Oxoniumionen H_3O^+ (im sauren Milieu) oder Hydroxidionen OH^- (im basischen Milieu) und H_2O . (Wenn nochmals nötig: Koeffizientenausgleich)

- Elektronenausgleich anpassen (Stoffausgleich wenn nötig)

5. Redox-Gesamtgleichung aufschreiben. (Kürzen nicht vergessen!)

Hinweis: Aufgabenlösung fokussiert vorrangig die Teilchenebene. Zusätzlich können konkrete Aspekte der Stoffebene bei der Gewinnung von Blei eingebunden werden. Dabei kann es sich um Aussagen zu den Stoffeigenschaften der Edukte und/oder Produkte sowie dem Versuch zur Gewinnung von Blei per se handeln:

Beispiele:

- Farbigkeit, bspw. Bleioxid als dunkelbraunes Pulver
- Aggregatzustände, bspw. $PbO_{(s)}$
- Allgemeines zu den Stoffeigenschaften, bspw. Blei als giftiges Schwermetall (leicht verformbar, bläulich-weiß, fest) oder Kohlenstoff als Nichtmetall (schwarzer Feststoff): Koks
- Vorkommen, bspw. Mineral Plattnerit
- Toxizität
- Aussagen zur Röstarbeit (aufbereitete Erze usw.)
- Aussagen zur Gewinnung von Blei im Schachtofen, ähnlich wie beim Hochofenprozess (inkl. zusätzlicher Informationen wie schlackebildende Zuschlagsstoffe, bspw. Kalk)

Testaufgabe 5

Paraphrasieren Sie in eigenen Worten die im Kasten angeführten Teil- und Gesamtgleichungen.

- Unter Abgabe von sechs Elektronen werden je drei Quecksilber-Atome zu jeweils drei zweifach positiv geladenen Quecksilber-Kationen oxidiert.
- Unter Aufnahme von sechs Elektronen werden je zwei Nitrat-Anionen zu je zwei Stickstoffmonoxid-Radikalen reduziert.
- 3 Quecksilber-Atome reagieren mit zwei Nitrat-Anionen und acht Protonen zu drei zweifachpositiv-geladenen Quecksilber-Anionen, zwei Stickstoffmonoxid-Radikalen und vier Dihydrogenmonoxid-Molekülen

Die folgenden Aussagen a) bis f) sollen die angeführten chemischen (Teil-) Reaktionen beschreiben. Die verschiedenen Lösungen stützen sich auf gängige Schülervorstellungen. Diskutieren Sie alle der angeführten Aussagen vor dem Hintergrund der chemischen Fachsprache und der Stoff- sowie Teilchenebenen. Bewerten Sie die Schülervorstellungen, die sich in den Aussagen wiederfinden, aus fachlicher Perspektive und nennen Sie gegebenenfalls Verbesserungsvorschläge

a) Bei der Reduktion von farbloser, flüssiger Salpetersäure entsteht farbloses, gasförmiges Stickstoffmonooxid.

FALSCH, da eine Missachtung von Trennung der Teilchen- und Stoffebene vorliegt. Es findet eine Reduktion von Nitrat-Ionen statt. Zwei Nitrat-Ionen 2NO_3^- reagieren durch Elektronenaufnahme zu zwei Molekülen Stickstoffmonooxid 2NO . Erwähnung der Koeffizienten zur genaueren Angabe der Teilchen fehlt. Die Elektronenaufnahme zur genaueren Erklärung der Reduktion wird nicht erwähnt. Auf Stoffebene werden Stoffeigenschaften (bspw. Farblosigkeit) genannt und fälschlicherweise mit den Reduktionsvorgängen auf Teilchenebene vermischt. Konkrete Trennung der Ebenen ist jedoch erforderlich. Die Verknüpfung von Reduktion mit der Oxidation mit Blick auf den Elektronenaustausch (Donator-Akzeptor) fehlt. Streng genommen: Säure = Teilchenebene → Korrekterweise müsste von salpetersaurer Lösung gesprochen werden!

b) Bei der Reduktion von Nitrat NO_3^- entsteht das farb- und geruchslose, giftige Gas NO .

FALSCH, da die Teilchen- und Stoffebene miteinander vermischt wurden. Es wurde die Reduktion auf Teilchenebene betrachtet, indem der Fokus korrekterweise auf das Nitrat-Teilchen gelegt wurde. Jedoch wurden die Stoffeigenschaften (Gas, farblos und geruchslos) als Beobachtungen fälschlicherweise mit der Erklärung auf Teilchenebene kombiniert. Die Kombination von Verbindungsnamen und Summenformel ist korrekt. Der Verbindungsname Stickstoffmonooxid fehlt. Erwähnung der Koeffizienten zur genaueren Angabe der Teilchen fehlt. Die Elektronenaufnahme zur genaueren Erklärung der Reduktion bleibt unerwähnt. Die Verknüpfung von Reduktion mit der Oxidation mit Blick auf den Elektronenaustausch (Donator-Akzeptor) fehlt.

c) Das silbrig-glänzende Schwermetall Quecksilber Hg wird als Reduktionsmittel zu drei zweifach positiv-geladenen Quecksilberionen oxidiert.

TEILWEISE RICHTIG, da die Oxidation von Quecksilber korrekt ist. Man hätte spezifisch auf das Quecksilber-Atom eingehen können. Die Fachsprache wird richtig eingesetzt (Reduktionsmittel). Die Kombination von Verbindungsnamen und Summenformel fehlt auf der Produktseite. Die Erwähnung der Koeffizienten zur genaueren Angabe der Teilchen fehlt. Die Elektronenabgabe zur genaueren Erklärung der Oxidation wird nicht erwähnt. Es werden Stoffeigenschaften mit den Teilchenprozessen fälschlicherweise verknüpft: Entweder liegt der Fokus auf der Stoffebene (metallisch-glänzende Schwermetall Quecksilber) ohne der Nennung von Summenformeln und Koeffizienten oder die Teilchenebene (mit der Oxidation zu zweifach positiv-geladenen Quecksilber-Kationen, inkl. Elektronenabgabe) wird ohne Stoffeigenschaften angegeben. Anstatt der Beschreibung „Silbrig-glänzend“ sollte „metallisch-glänzend“ gewählt werden. Die Verknüpfung von Reduktion mit der Oxidation mit Blick auf den Elektronenaustausch (Donator-Akzeptor) fehlt.

d) Drei Quecksilberatome (3 Hg) werden als Oxidationsmittel zu aquatisierten Quecksilberionen (Hg^{2+}) oxidiert.

TEILWEISE FALSCH, da der Einsatz der Fachbegriffe nicht korrekt ist. Quecksilber ist das Reduktionsmittel, da es die Nitrat-Ionen reduziert und selbst oxidiert wird. Kombination von Verbindungsnamen und Summenformel mit richtigen Quantifizierungen wird nur teilweise berücksichtigt. Es entstehen aus drei Quecksilber-Atomen drei Quecksilberionen 3Hg^{2+} . Die Oxidation von Quecksilber Hg wird korrekt formuliert. Die Elektronenabgabe zur genaueren Erklärung der Oxidation wird nicht erwähnt. Aus der Reaktionsgleichung geht nicht hervor, dass die Ionen aquatisiert sind (fehlerhafte Paraphrasierung). Insofern eine Schlussfolgerung getätigt wird, dass die Ionen in wässriger Lösung vorliegen, muss die Stoffebene konkret als diese angegeben werden. Die Verknüpfung von Reduktion mit der Oxidation mit Blick auf den Elektronenaustausch (Donator-Akzeptor) fehlt.

e) Bei der Reduktion von Nitrat NO_3^- und der damit einhergehenden Oxidation von Quecksilber entstehen Quecksilber (II)-Ionen, molekulares NO und Wasser.

TEILWEISE FALSCH, da die Kombination von Verbindungsnamen und Summenformel nur teilweise berücksichtigt wird und die Verwendung von Text und Symbol nicht einheitlich ist. Bei der Reduktion von Nitrat NO_3^- und der damit einhergehenden Oxidation von Quecksilber Hg entstehen Quecksilber (II)-Ionen Hg^{2+} , Stickstoffmonoxid NO und Wasser H_2O . Die Teilchen- und Stoffebene wird vermischt. Dies zeigt sich vor allem an der Betonung des molekularen Stickstoffmonoxids und dem Begriff der Alltagssprache „Wasser“ ohne Summenschreibweise. Erwähnung der Koeffizienten zur genaueren Angabe der Teilchenanzahlen fehlt. Die Elektronenaufnahme und – abgabe zur genaueren Erklärung der Redoxreaktion bleibt unerwähnt.

f) Das silbrig-glänzende Schwermetall Quecksilber wird durch Abgabe von sechs Elektronen reduziert. Es liegen sodann Quecksilberionen in Wasser und oxidiertes Stickstoffmonoxid vor.

FALSCH, da der Fachbegriff „reduziert“ im Zusammenhang mit der Elektronenabgabe (Oxidation) verwendet wurde. Die Abgabe der Elektronen wurde mit korrekter Anzahl berücksichtigt, doch fehlt die Nennung der Koeffizienten auf Edukt- und Produktseite. Obgleich die Produkte Wasser und Stickstoffmonoxid genannt wurde, wurde die Reduktion des Nitrat-Teilchens im sauren Milieu vergessen. Die Verwendung von Texten ohne Symbolschreibweisen ist einheitlich und damit fachsprachlich korrekt. Es

wurde bspw. auf Stoffebene Quecksilber als Schwermetall beschrieben und auf Produktseite die Teilchenebene hinsichtlich der Oxidation zu den Kationen betrachtet. Es liegt somit eine Vermischung von Stoff- und Teilchenebene vor. Die Aussage scheint im Allgemeinen den Fokus auf die Stoffebene zu legen und bindet fälschlicherweise uneinheitlich Elemente der Teilchenebene ein. Die Angaben der Stoffeigenschaften sollte einheitlich sein (hier lediglich nur beim Edukt Quecksilber). Der Ausdruck „oxidierter Stickstoffmonoxid“ ist nicht zutreffend gewählt. Anstatt der Beschreibung „Silbrig-glänzend“ sollte „metallisch-glänzend“ gewählt werden

Allgemeiner Hinweis: Auf Zusammenhang zwischen Aussagen und der oben angeführten Symbol-schreibweise achten!

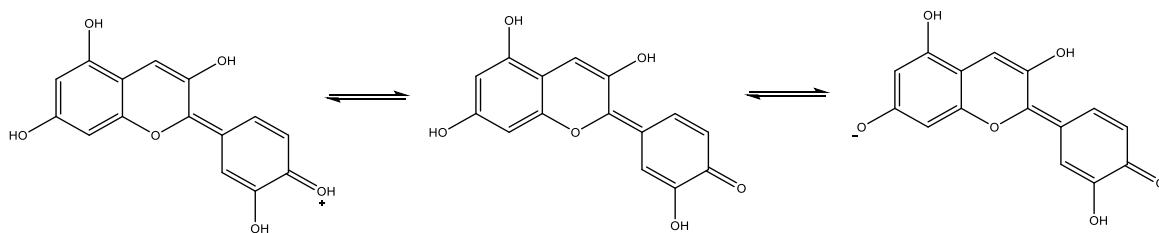
A.3.1.5 Musterlösungen des Posttests

Testaufgabe 1

Erklären Sie mithilfe der Abbildung die Farben des Kohls.

Herstellen von Beziehungen zwischen Stoff- und Teilchenebene:

Der in dem Gemüse enthaltenen Farbstoff Cyanidin stellt einen Indikator zur Identifizierung des Säuregehalts dar (Farbsäure). Dieser ändert je nach vorliegendem PH-Wert also seine Farbe aufgrund der Änderung seiner Protonenkonzentration. Der Name Rotkohl erklärt sich durch einen sauren PH-Wert der Umgebung. Im Gegensatz dazu wird der Name Blaukraut verwendet, wenn sich das Gemüse im alkalischen Milieu befindet.

Teilchenebene (Stoffebene):

Die Abbildung zeigt die mesomeren Grenzstrukturen von Cyanidin auf.

Bei näherer Betrachtung der funktionellen Gruppen (R-OH) wird die Bedeutung der Gleichgewichtsreaktionen (gekennzeichnet durch Gleichgewichtspfeile) deutlich.

Die linke Struktur beschreibt Cyanidin im vollständig protonierten Zustand in saurem Milieu. Dies ist erkenntlich an den zahlreichen Hydroxygruppen R-OH und der positiven Ladung. Es liegt also ein niedriger PH-Wert mit einer hohen Protonenkonzentration vor. Es handelt sich um eine Säure, die als Protonendonator fungiert. (Der Name „Rotkohl“ lässt sich dieser Struktur zuordnen, da für das Auge eine rote Farbe beobachtet werden kann). Die Struktur ist nach außen hin einfach positiv geladen.

In der mittleren Struktur wurde die positiv-geladene Hydroxygruppe R-OH⁺ deprotoniert (R-O). (Für das Auge ist eine pinke Farbe ersichtlich). Cyanidin befindet sich im neutralen Milieu. Das Molekül ist gesamt neutral geladen.

Die rechte mesomere Grenzstruktur zeigt eine deprotonierte Hydroxygruppe r-O⁻ und eine deprotonierte Ketogruppe R-O auf. Der Farbstoff Cyanidin enthält eine reduzierte Anzahl an Hydroxygruppen R-OH. Bei steigendem PH-Wert verschiebt sich das GGW nach rechts: Die

Protonenkonzentration hat wegen der Zunahme des PH-Werts abgenommen. Das Molekül ist gesamt einfach negativ geladen. Es handelt sich um das Gemüse unter alkalischen Bedingungen. Denn eine Base ist ein Protonenakzeptor (Es liegt schließlich Blaukraut vor, da eine blaue Farbe vom Auge wahrgenommen wird).

Hinweise:

- Die abgegebenen (bzw. die bei der Rückreaktion aufgenommenen) Protonen H^+ sind in der Abbildung nicht dargestellt. Der Richtigkeit halber sollte dies während der Bearbeitung erwähnt werden.
- Aussagen zu den konjugierten Doppelbindungen können zur Erklärung angeführt werden (Stichwort: Umklappen der Elektronpaarbindungen).
- Aussagen zur Absorption können zur tiefergehenden Erklärung angeführt werden (bspw.: In saurer Lösung absorbiert das Cyanidin-Kation Licht im Bereich von ca. 450-580 nm: grüne Farbe → Komplementärfarbe wird von Auge auf Stoffebene wahrgenommen: rot)

Testaufgabe 2

s. Prätest

Testaufgabe 3

Vervollständigen Sie die Reaktionsgleichungen in den Kästen und fertigen Sie eine Skizze zur Herstellung von Eisen im Hochofen an.

Teilchenebene:

Vorwärmzone: $2 CO + O_2 \rightarrow 2 CO_2$ (exotherme Reaktion)

Reaktionszone: $Fe_2O_3 + 3 CO \rightarrow 2 Fe + 3 CO_2$

Schmelzzone: $2 C + O_2 \rightarrow CO_2$ (exotherme Reaktion)

Skizze auf Stoffebene (mit Elementen auf Teilcheneben wegen Darstellung)

Stoff- und Teilchenebenen können stets parallel verwendet werden, müssen aber in den Schilderungen und Erklärungen voneinander abgegrenzt werden.

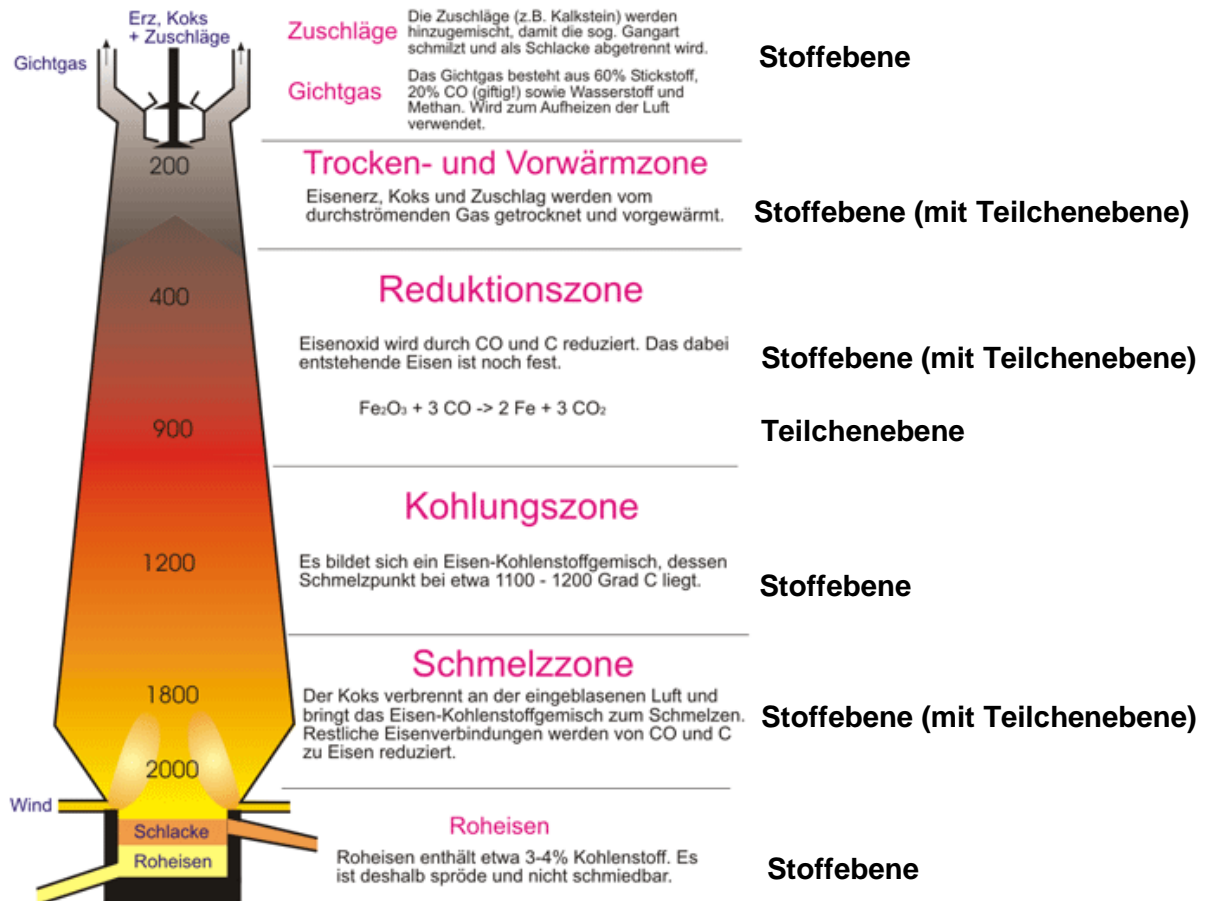


Abbildung zum Hochofenprozess (übernommen von Schmidt, 1993)

Erklären Sie mithilfe der angeführten Informationen zu den Hochofenprozessen die Herstellung von Eisen.

Stoffebene (Teilchenebene: s.o. Reaktionen):

In der Schmelzzone wird Heißluft eingeblasen. Es entstehen Temperaturen von bis zu 2000 °C. Koks und Sauerstoff reagieren zu Kohlenstoffmonooxid. Die freiwerdende Wärme-Energie bewirkt, dass das in höheren Zonen entstandene Eisen sowie die aus Gestein und Zuschlägen entstandene Schlacke schmelzen.

Hinweis: Kohlunzone wurde mit Temperaturen zwischen ca. 1500 und 1000 °C in der Aufgabenstellung nicht angegeben: In dieser Zone entsteht aus dem entstandenen Kohlenstoffdioxid, zusammen mit Kohlenstoff, Kohlenstoffmonooxid (Stichwort: Redoxreaktion auf Teilchenebene).

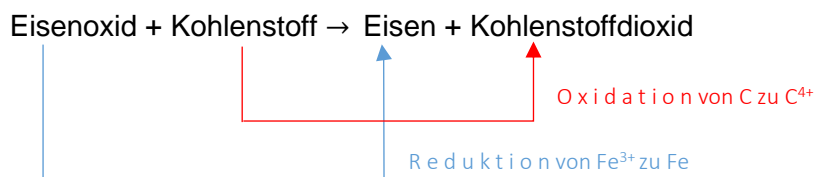
Das entstandene Kohlenstoffmonooxid-Gas steigt auf und reagiert mit dem festen Eisenoxid in der Reaktionszone. Dabei herrschen Temperaturen zwischen 900 und 1000 °C. Kohlenstoffmonooxid dient als Reduktionsmittel und reduziert das Eisenoxid zu elementarem Eisen wobei Kohlenstoffdioxid-Gas entsteht.

In der Vorwärmzone reagiert weiter aufsteigendes Kohlenstoffmonoxid mit Sauerstoff zu Kohlenstoffdioxid. Das von oben eingefüllte Material wird auf- bzw. vorgewärmt, bevor sie als "Gichtgas" abgeleitet werden.

Das entstandene Eisen fließt nach unten ab (aufgrund der zunehmend hohen Temperaturen). Wegen der vergleichsweise größeren Dichte sammelt es sich schließlich unter der flüssigen Schlacke am Boden des Hochofens und kann dort abgestochen bzw. dem Hochofen entnommen werden.

Erläutern Sie in diesem Zusammenhang die chemischen Hintergründe von Redoxreaktionen.

Grob vereinfacht läuft im Hochofen folgende chemische Reaktion als Redoxreaktion ab:



Reduktionsmittel: Stoff, der die Reduktion eines anderen Stoffes bewirkt (hier: Kohlenstoff)

Oxidationsmittel: Stoff, der die Oxidation eines anderen Stoffes bewirkt (hier: Eisenoxid)

Das im Eisenoxid enthaltene Eisen-Kation wird durch Kohlenstoff zu Eisen reduziert. Dabei wird gleichzeitig Kohlenstoff durch das im Eisenoxid enthaltene Eisen-Kation zum Kohlenstoff-Kation, welches im Kohlenstoffdioxid enthalten ist, oxidiert.

Hinweis:

- Nennung des Boudouard-Gleichgewichts auf Teilchenebene (Kohlenstoffdioxid und Kohlenstoff reagieren zu Kohlenstoffmonooxid) denkbar.
- Oxidationszahlen können ergänzt werden.
- Detaillierte Erklärungen zu Redoxreaktionen (Teilchenebene) in Schmelz- und Reaktionszone durch Angabe von Elektronenübergängen (Aufstellen der Teilgleichungen) möglich.
- Detaillierte Beschreibungen zum Vorgang (Stoffebene) denkbar, bspw. Informationen wie: *Kohlenstoff wird als Koks, der aus Steinkohle durch Erhitzen unter Luftabschluss in einer sog. "Kokerei" hergestellt wird, eingesetzt. Weil das Eisenerz neben Eisenoxid auch noch Gestein enthält, wird es mit sog. "Zuschlägen" versetzt (z.B. Kalkstein). Diese sorgen dafür, dass das Gestein leichter schmelzen kann, später als flüssige "Schlacke" auf dem flüssigen Eisen "schwimmt" und einfach abgetrennt werden kann.*

Testaufgabe 4

s. Prätest

Testaufgabe 5

Paraphrasieren Sie in eigenen Worten die im Kasten angeführte chemische Reaktion.

In Textform: festes Kupferoxid als bspw. gebranntes Kupfer (Auf Teilchenebene: CuO) reagiert mit festem Eisen-Metall (Auf Teilchenebene: Fe) zu festem Kupfer-Metall (Auf Teilchenebene: Cu) und festem Eisenoxid als bspw. Rost (Auf Teilchenebene: FeO)

Die verschiedenen Lösungen stützen sich zum Teil auf gängige Schülervorstellungen. Diskutieren Sie alle der angeführten Aussagen vor dem Hintergrund der chemischen Fachsprache und der Stoff- sowie Teilchenebenen.

- a) *Bei der Reduktion von Kupferoxid und der Oxidation von Eisen erhält man als Produkt Eisenoxid mit roten Kupferkügelchen.*

FALSCH, da Teilchen- und Stoffebene miteinander vermischt werden. Es handelt sich – nach strikter Betrachtung der Teilchenebene - NICHT um die Reduktion von Kupferoxid, sondern der Reduktion von Kupfer (II) – Ionen (Cu^{2+}) zu elementarem Kupfer (Cu). Kombination von Verbindungsnamen und Summenformel bleibt unberücksichtigt und könnte ergänzt werden. Die angegebenen Aggregatzustände werden nicht erwähnt (Die Kupfer (II) – Ionen Cu^{2+} des festen Kupferoxids CuO). Die Aufnahme (bzw. –Abgabe) von zwei Elektronen zur genaueren Erklärung der Reduktion (bzw. Oxidation) wird nicht erwähnt. Ferner wird das Produkt Kupfer auf Stoffebene beschrieben, alle anderen Stoffeigenschaften bleiben unberücksichtigt. Es wird nicht klar auf welcher Ebene sich die Aussage bewegt. Falls die Teilchenebene fokussiert werden sollte, fehlen Informationen zur Aufnahme (bzw. –Abgabe) von zwei Elektronen mit Blick auf die exakte Erklärung der Reduktion (bzw. Oxidation).

- b) *Bei der gegebenen Redoxreaktion wird das Sauerstoffatom von Kupferoxid auf das Eisen übertragen. Es handelt sich um einen Sauerstoffaustausch mit O_2 - Molekülen.*

FALSCH, da Redoxreaktionen einen Austausch mit Elektronen, nicht mit Sauerstoff, beinhalten. Die Assoziation, dass eine Sauerstoffübertragung forciert wird, provoziert die Fehlvorstellung des Freiwerdens und Reagierens von elementarem Sauerstoff. Es sollte stattdessen gezielt auf Reduktion und Oxidation eingegangen werden. Ferner erweckt die Aussage „das Sauerstoffatom von Kupferoxid“, dass ein Mischkonzept vorliegt.: Es sollte von Oxid-Anionen gesprochen werden. Demzufolge scheint auch der Begriff „ O_2 – Molekülen“ vollkommen willkürlich gewählt zu sein ohne die Teilchenprozesse selbst genauer zu betrachten. Schließlich sollte der Einheitlichkeit zu Liebe auch auf die Symboldarstellung O_2 verzichtet werden, nachdem alle anderen Verbindungsnamen ausgeschrieben wurden. Ferner bleiben die Aggregatzustände sowie die gesamten Angaben von Edukten und Produkten unberücksichtigt.

- c) *Bei der Reduktion der Kupfer-Ionen und der Oxidation von festem Eisen entsteht elementares Kupfer und FeO.*

FALSCH. Teilchen- und Stoffebene wird nicht richtig voneinander getrennt. Es würde korrekterweise auf die Reduktion und Oxidation der Teilchen (auf Teilchenebene) eingegangen werden, wenn denn

der Aggregatzustand „fest“ wegbliebe. Es erweckt den Anschein als würde das Eisen-Teilchen als Stoffportion angesehen werden. In der Aussage könnte auch ein Wechsel in den Ebenen stattfinden. Die Reduktion wird auf Teilchenebene und die Oxidation wird auf Teilchenebene betrachtet. Der Begriff „Eisen“ ist nicht klar der Stoff bzw. der Teilchenebene zuzuordnen. Die Kombination von Verbindungsnamen und Summenformel bleibt unberücksichtigt und könnte hierfür nützlich sein. Hinsichtlich der Fachsprache findet auf Produkt- und Eduktseite ein Repräsentationswechsel statt. Es sollte einheitlich eine Repräsentationsform oder MER gewählt werden. Die Aussage scheint zudem auf Produktseite erneut Stoffebene (elementares Kupfer) mit der Teilchenebene (FeO) zu vermischen. Zudem wird Fe auf Teilchenebene zu Fe^{2+} und nicht FeO oxidiert. Möchte man auf Stoffebene die Oxidation zu Eisenoxid betrachten, so gilt die Summenschreibweise zu vernachlässigen.

d) Bei der Redoxreaktion wird das Oxid-Anion O^{2-} von Kupferoxid CuO auf das Eisen Fe übertragen. Dabei entstehen rote Kupferatome Cu und grauschwarzes Eisenoxid FeO.

TEILWEISE FALSCH. Teilchenebene fälschlicherweise mit der Stoffebene vermischt: Teilchen sind keine Stoffportionen und entsprechen nicht der Stofffarbe. Es wäre der Teilchenverbund der eine Farbigkeit aufzeigt (keine roten Atome). „Grauschwarzes Eisenoxid“ kann formuliert werden, insofern sich die Aussage auf Stoffebene bewegt. Da jedoch auch von Anionen, Atomen die Rede ist, verschmilzt die Aussage fälschlicherweise und in jedem Fall Stoff- und Teilchenebene miteinander. Die Kombination von Verbindungsnamen (bspw. auf Stoffebene) und Summenformel (bspw. auf Teilchenebene) wird berücksichtigt. Sowohl die Edukt- als auch die Produktseite wird betrachtet. Allgemein fehlen die Begriffe Reduktion und Oxidation, sowie deren nähere Bedeutung. Die Formulierung setzt falschen Fokus. Per se ist die Übertragung des Oxid-Anions O^{2-} des Kupferoxids CuO auf das Eisen Fe korrekt, jedoch sollten Redoxreaktionen nicht mithilfe von Sauerstoffaustauschen erläutert werden. Fehlvorstellungen könnten hervorgerufen werden. Besser: Elektronenübergänge betrachten. Keine Berücksichtigung der Aggregatzustände auf Stoffebene.

e) Bei der exothermen Reaktion ist nach Entfernen des Bunsenbrenners noch immer ein Glühen zu beobachten, sodass die Cu^{2+} -Ionen des Kupferoxids zu Cu-Atomen reduziert und das Eisen zu Fe^{2+} -Ionen oxidiert werden.

TEILWEISE FALSCH, die Aussage bewegt sich durch die Nennung der Beobachtung auf Teilchenebene und geht plötzlich auf die Teilchenebene (Cu^{2+} -Ionen usw.) über. Hier sollte ganz klar zwischen den Ebenen differenziert und deutlich gemacht werden, dass die Beobachtung mithilfe der Teilchenebene erklärt wird. Die Konjunktion „sodass“ könnte einen falschen Bezug mit Blick auf die zeitliche Abfolge herstellen. Das „Glühen“ ist Teil der Versuchsbeobachtung und nicht für die Reduktion bzw. Oxidation verantwortlich. Die Reaktion selbst bewirkt auf Stoffebene diese Beobachtung. Es wäre wünschenswert gewesen (wenigstens) auf die Aggregatzustände sowie Produkte selbst, auf Stoffebene einzugehen, und dann die Reduktion und Oxidation als Erläuterung auf Teilchenebene anzuführen. Verbindungsnamen und Summen- bzw. Ionenformeln werden uneinheitlich kombiniert, sodass fachsprachlich nicht klar wird auf welchen Ebenen man sich befindet.

- f) *Die Redoxreaktion findet ausschließlich zwischen Cu^{2+} - Ionen und Fe - Atomen durch eine Übertragung der Elektronen statt.*

TEILWEISE RICHTIG, da die Redoxreaktion mittels Elektronenübertragung definiert wird. repräsentative Kombination von Kupfer (II) – Ionen mit Cu^{2+} oder Eisen mit Fe wäre wünschenswert gewesen. Dennoch macht die Aussage sehr deutlich, dass man sich auf Teilchenebene (s. Atome, Ionen) befindet. Es wird lediglich die Edukt- und nicht die Produktseite betrachtet. Insbesondere der Begriff „ausschließlich“ verstärkt den Eindruck, dass die Produktseite gleichgültig sein könne. Es bedarf einer Korrektur. Die Elektronenaufnahme (bzw. –Abgabe) zur genaueren Erklärung der Reduktion (bzw. Oxidation) wird nicht erwähnt. Es fehlt die Berücksichtigung der Aggregatzustände.

A.3.1.6 Lernumgebung

s. elektronischer Anhang in A.4

A.3.1.7 Musterlösungen der Aufgaben aus der Lernumgebung

Allgemeine Hinweise zu den Aufgaben aus der App

Stoffebene: Die makroskopische Ebene beschreibt reale, beobachtbare Phänomene der materiellen Welt, die wir sehen, riechen und fühlen können.

Teilchenebene: Die submikroskopische Ebene fokussiert Partikel (z.B. Atome, Ionen, chemische oder physikalische Prozesse). Mit ihr kann die stoffliche Welt erklärt werden.

Lernpfad *Versuchsaufbau* – Lösung

Aufgabe 1

Beschreiben Sie jetzt mithilfe der realen Experiments kurz in eigenen Worten den realen Versuchsaufbau.

Nennung aller Gerätschaften (Uhr-Rohr mit Glaswolle, Stative mit Muffen und Klemmen, farblose Flüssigkeit > Zinkiodidlösung, Gleichspannungsquelle ausgeschaltet usw.):

- Fokus auf Stoffebene (keine Erklärungen auf Teilchenebene o.ä.)
- Achtung: korrekte Fachbegriffe und exaktes Beschreiben des Versuchsaufbaus

Aufgabe 2

Unter Zuhilfenahme des realen Experiments, der digitalen (bzw. AR-) Lernumgebung und Ihres Vorwissens

...beschreiben Sie den realen Versuchsaufbau des Experiments

s. Aufgabe 1 → Vergleich (Aha-Effekte? Nennung neuer Wissens Elemente?)

...reflektieren Sie den Versuchsaufbau

- Hinweise (erste Erklärungen auf Teilchenebene mit weiterführenden Gedanken/Ideen denkbar) zur Stoffebene: Glaswolle dient als Membran, indem die Ionen (im Vergleich zu den Molekülen) diese durchdringen können.

Lernpfad *Diffusion* – Lösung

Aufgabe 1

Beschreiben Sie jetzt mithilfe des realen Experiments kurz in eigenen Worten die chemischen bzw. physikalischen Prozesse, die Sie vor Anlegen der Gleichspannungsquelle auf Teilchenebene erwarten.

Nennung der Ionenbewegungen auf Teilchenebene (Brown'sche Molekularbewegung, Dissoziation, Hydratation usw.):

- Fokus auf Teilchenebene (wobei Stoffebene im Wechsel in Erklärungen eingebunden werden kann/soll, bspw.: „Brown'sche Molekulbewegung der Zink-Kationen und Iodid-Anionen, welche aufgrund der kleinen Radienverhältnisse durch die Glaswolle hindurch diffundieren.“)
- Wechsel von Stoff auch Teilchenebene berücksichtigen, indem die Zusammensetzung der Lösung thematisiert wird.

Aufgabe 2

Unter Zuhilfenahme des realen Experiments, der digitalen (bzw. AR-) Lernumgebung und Ihres Vorwissens

...beschreiben und erklären Sie die chemischen und physikalischen Prozesse, die bei der Diffusion ablaufen.

s. Aufgabe 1 → Vergleich (Aha-Effekte? Nennung neuer Wissens Elemente?)

...diskutieren Sie den Mehrwert der digitalen Objekte in der Lernumgebung für Ihre Erklärungen zur Diffusion.

- Fokus auf Modelldarstellungen → Bsp.: 3D-Bilder zur Differenzierung zwischen den Ionenradien; Quantitatives Verhältnis der Ionen; Gleichverteilung, usw.
- Stoff-Teilchen-Ebenenwechsel → Bsp.: Super-Lupe

...reflektieren Sie die Repräsentationsformen Text, Symbol und Bild hinsichtlich der Diffusion.

- Repräsentationswechsel mit Fokus auf Unterschiede in den Modelldarstellungen → Bsp.: Ionenradius
- Vor- und Nachteile der einzelnen Darstellungsformen (Einbezug von Gestaltungskriterien oder Schülervorstellungen)

Lernpfad *Elektrolyse* – Lösung

Aufgabe 1

Beschreiben Sie jetzt mithilfe des realen Experiments kurz in eigenen Worten die chemischen bzw. physikalischen Prozesse, die Sie nach Anlegen der Gleichspannungsquelle auf Teilchenebene erwarten.

Nennung der Ionenbewegungen auf Teilchenebene (Elektrolyse; Elektronenaufnahme und -abgabe; Bildung von Iodmolekülen und Zinkatomen; Elektronenbewegungen):

- Fokus auf Teilchenebene (wobei Stoffebene im Wechsel in Erklärungen eingebunden werden kann/soll, bspw.: „Die Zink-Kationen bewegen sich zur Kathode und nehmen zwei Elektronen auf, sodass sich Zinkatome bilden. Auf Stoffebene wird dieser Prozess ersichtlich, indem sich ein graues Zinkbäumchen an der Graphit-Elektrode abscheidet“)
- Wechsel von Stoff auf Teilchenebene berücksichtigen, indem die erwarteten sichtbaren Veränderungen (Farbigkeit: gelbe Schlieren → Ansammlung bei Glaswolle; Abscheiden eines grauen Feststoffes usw.) thematisiert (beschrieben) und mittels Teilchenebene erklärt werden.

Aufgabe 2

Unter Zuhilfenahme des realen Experiments, der digitalen (bzw. AR-) Lernumgebung und Ihres Vorwissens

...beschreiben Sie Ihre Beobachtungen während des Versuchsablaufs

s. Aufgabe 1 → Vergleich (Aha-Effekte? Nennung neuer Wissensselemente?)

...beschreiben und erklären Sie die chemischen und physikalischen Prozesse, die bei der Elektrolyse ablaufen.

s. Aufgabe 1 → Vergleich (Aha-Effekte? Nennung neuer Wissensselemente?)

...diskutieren Sie den Mehrwert der digitalen Objekte in der Lernumgebung für Ihre Erklärungen zur Elektrolyse.

- Fokus auf Modelldarstellungen → Bsp.: 3D-Bilder zur Differenzierung zwischen den Ionenradien; Quantitatives Verhältnis der Ionen, Atome und Moleküle; Gleichverteilung, usw.
- Stoff-Teilchen-Ebenenwechsel → Bsp.: Super-Lupe (Beobachtung vs. Prozess)

...reflektieren Sie die Repräsentationsformen Text, Symbol und Bild hinsichtlich der Elektrolyse.

- Repräsentationswechsel mit Fokus auf Unterschiede in den Modelldarstellungen → Bsp.: Ionenradius → Glaswolle
- Vor- und Nachteile der einzelnen Darstellungsformen (Einbezug von Gestaltungskriterien oder Schülervorstellungen)

...reflektieren Sie die chemischen und physikalischen Prozesse vor und während des Versuchsablaufs.

- Zusammenfassung der Teilchenbewegungen vorher und nachher

Lernpfad *Chemische Reaktion* – Lösung

Aufgabe 1

Beschreiben Sie jetzt mithilfe des realen Experiments kurz in eigenen Worten welche chemischen Reaktionen Sie bei der Versuchsdurchführung erwarten.

Fokus auf Teilchenebene: Aufstellen der Teilgleichungen → Oxidation, Reduktion und Redoxreaktion (Achtung: Fachsprache mit Fachbegriffen wie Reduktionsmittel usw.)

Aufgabe 2

Unter Zuhilfenahme des realen Experiments, der digitalen (bzw. AR-) Lernumgebung und Ihres Vorwissens

...nennen Sie die chemischen Reaktionen, die bei der Elektrolyse ablaufen.

s. Aufgabe 1 → Vergleich (Aha-Effekte? Nennung neuer Wissens Elemente?)

...erklären Sie allgemein die chemischen Hintergründe von Redoxreaktionen.

- Fokus auf Teilchenebene: Aufstellen allgemeiner Redoxreaktion mit Gesamtgleichung (Elektronendonator und -akzeptor, Elektronenaufnahme und -abgabe, Elektronen-, Koeffizienten-, Ladungs- und Stoffausgleich)
- Fokus auf exaktes Paraphrasieren und Nennung von Fachbegriffen

...diskutieren Sie den Mehrwert der digitalen Objekte in der Lernumgebung für Ihre Erklärungen zu den chemischen Reaktionen.

- Fokus auf Modelldarstellungen → Bsp.: Reaktionsgleichungen mit Koeffizienten (Symbol vs. Bild)
- Stoff-Teilchen-Ebenenwechsel → Bsp.: Verknüpfung der Lernpfade → Förderung von leistungsschwächeren – oder stärkeren SuS (Vergleich der Häufigkeiten in Symbol und Bild)

...reflektieren Sie die Repräsentationsformen Text, Symbol und Bild hinsichtlich der chemischen Reaktionen bei der Elektrolyse.

- Repräsentationswechsel mit Fokus auf Unterschiede in den Modelldarstellungen → Bsp.: Ionenradius (Redundanz?)

- Vor- und Nachteile der einzelnen Darstellungsformen (Einbezug von Gestaltungskriterien oder Schülervorstellungen)

A.3.2 Kategoriensysteme

Tabelle A19. Ursprüngliches Kategoriensystem zum Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis (KAT 1).

Nummer	Name der Ober- bzw. Unterkategorie
1.	Hinzufügen von Wissenselementen durch Abruf zugehörigen Wissens aus dem Gedächtnis
1.1	Nennung von Wissenselementen, die nicht in der gerade behandelten Aufgabe behandelt werden
1.1.1	Aus einer vorherigen Aufgabe auf Teilchenebene
1.1.2	Aus einer vorherigen Aufgabe auf Stoffebene
1.1.3	Aus dem Vorwissen
1.1.3.1	Inhalte auf Teilchenebene
1.1.3.2	Inhalte auf Stoffebene
1.2	Suche nach Beziehungen
1.2.1	auf Teilchenebene
1.2.2	auf Stoffebene
1.2.1	mit dem Vorwissen
1.2.1.1	Stoffebene
1.2.1.2	Teilchenebene
2.	Vergeblicher Abruf von Vorwissen/Information aus dem Gedächtnis
3.	Hinzufügen von Wissen durch Wissenserzeugung mittels (logischer) Inferenzen
3.1	Inferenzen, die dem Aufbau einer Text-/Symbol-/Bildbasis dienen mit Einfluss auf den adäquaten Umgang der Fachsprache
3.1.1	Paraphrasieren in Stoff- und/oder Teilchenebene
3.1.1.1	Von Repräsentationsform auf Teilchenebene
3.1.1.2	von Repräsentationsform auf Stoffebene
3.1.2	Herstellen von Beziehungen zwischen Teilchen- und Stoffebene
3.1.3	Lösungswege beschreiben
3.1.3.1	Teilchenebene wählen
3.1.3.2	Stoffebene wählen
3.1.3.3	Teilchenebene anwenden
3.1.3.4	Stoffebene anwenden
3.1.3.5	Stoff- und Teilchenebene anwenden
3.2	Inferenzen, die dem Aufbau eines Situationsmodells dienen
3.2.1	Schlussfolgerungen auf Stoff- und Teilchenebene unter Verwendung der in den Aufgaben gegebenen Informationen
3.2.2	Schlussfolgerungen auf Teilchenebene (Codierung, nur wenn eindeutig)
3.2.1.2	Schlussfolgerungen auf Stoffebene (Codierung, nur wenn eindeutig)
3.2.1.3	Schlussfolgerungen auf Stoff- und Teilchenebene (Codierung, nur wenn eindeutig)
3.2.2	Ergebnis nennen
3.2.3	Inhaltliche Fragen an sich selbst
3.2.4	Nennung eines selbst erdachten Teilproblems
3.2.5	Diagnose eigener Fehler beim Elaborieren nach 3.2.1 bis 3.2.4
3.2.5.1	Diagnose mittels Teilchenebene

- 3.2.5.2 Diagnose mittels Stoffebene
 - 3.2.5.3 Diagnose mittels Stoff- und Teilchenebene
 - 3.2.5.4 Wahrnehmen von Widerspruch
 - 3.3 Inferenzen, die über Stoff- und Teilchenebene hinausgehen
 - 3.3.1 Bemerkungen zum methodischen Vorgehen
 - 3.3.2 Eigene weiterführende Gedanken
 - 3.3.3 Zweifel an den Inhalten mit Blick auf Stoff- und Teilchenebene
 - 3.3.4 Inhaltliche Bewertung der Stoff- und Teilchenebenen
 - 3.3.4.1 die Teilchenebene
 - 3.3.4.2 die Stoffebene
 - 3.3.4.3 Stoff-Teilchen-Ebenenwechsel
 - 3.3.5 Äußerungen die Unsicherheit ausdrücken
 - 4. Reduktion von Detailwissen durch Streichung
 - 4.1 Zieldefinitionen
 - 4.2 Schwerpunktsetzungen
 - 4.2.1 Schwerpunktsetzung Teilchenebene
 - 4.2.2 Schwerpunktsetzung Stoffebene
 - 4.2.3 Schwerpunktsetzung Stoff-Teilchen-Ebenenwechsel
 - 4.3 Detailreduktion
 - 4.3.1 Detailreduktion Teilchenebene
 - 4.3.2 Detailreduktion Stoffebene
 - 4.4 Text- und/oder Symbolzusammenfassungen
 - 5. Oberflächenelaboration
 - 5.1 Kontrolle von Text- oder Symbolmerkmalen
 - 6. Monitoring Statements
 - 6.1 VERständnis Statements
 - 6.2 MISverständnis Statements
 - 6.3 Neues und Interesse
 - 6.4 Umgang mit dem Text und Symbol hinsichtlich Stoff- und Teilchenebene
 - 7. Restkategorie
 - 7.1 Verbalisierungen, die nicht im thematischen Zusammenhang mit den Aufgaben stehen (Unsinn, z.T. spontane Assoziationen)
 - 7.2 Verbalisierungen, die im thematischen Zusammenhang mit den Aufgaben stehen, jedoch nicht eindeutig einer Kategorie zuzuordnen sind.
 - 7.3 Wortgetreue Wiederholung von gesprochenem/n Text/Symbolen in sehr kurzem Abstand zum Gesagten (bis zu etwa eine Satzlänge).
-

Tabelle A20. Ursprüngliches Kategoriensystem zur chemischen Fachsprache (KAT 2).

Nummer	Name der Haupt- bzw. Unterkategorie
1.	Hinzufügen von Wissenselementen durch Abruf zugehörigen Wissens aus dem Gedächtnis
1.1	Nennung von Wissenselementen, die nicht in der gerade behandelten Aufgabe behandelt werden
1.1.1	Aus dem Text
1.1.2	Aus dem Symbol
1.1.3	Aus der AR- bzw. Video-Lernumgebung
1.1.4	Aus dem Vorwissen
1.2	Suche nach Beziehungen
1.2.1	mit dem Text
1.2.2	mit dem Symbol
1.2.3	mit der AR- bzw. Video-Lernumgebung
1.2.4	mit dem Vorwissen
1.3	Nachschlagen und nochmals lesen
1.3.1	Text aus vorherigen Aufgaben
1.3.2	Im Symbol aus vorherigen Aufgaben
1.3.3	Im Text zu der gerade behandelten Aufgabe
1.3.4	Im Symbol zu der gerade behandelten Aufgabe
3.	Hinzufügen von Wissen durch Wissenserverzeugung mittels (logischer) Inferenzen
3.1	Inferenzen, die dem Aufbau einer Text-/Symbol-/Bildbasis dienen
3.1.1	Paraphrasieren zwischen den Repräsentationsformen
3.1.1.1	aus Text in Text
3.1.1.2	aus Text in Symbol
3.1.1.3	aus Text in Bild
3.1.1.4	aus Symbol in Text
3.1.1.5	Aus Symbol in Bild
3.1.2	Herstellen von Beziehungen zwischen unterschiedlich repräsentierender Information
3.1.3	Lösungswege beschreiben
3.1.3.1	Repräsentationsform ‚Text‘ wählen
3.1.3.2	Repräsentationsform ‚Symbol‘ wählen
3.1.3.3	Repräsentationsform ‚Text-Symbol‘ wählen
3.1.3.4	Repräsentationsform ‚Text‘ anwenden
3.1.3.5	Repräsentationsform ‚Symbol‘ anwenden
3.1.3.6	Repräsentationsform ‚Bild‘ anwenden
3.1.3.7	Repräsentationsform ‚Symbol-Bild‘ anwenden
3.1.3.8	Repräsentationsform ‚Text-Symbol‘ anwenden
3.1.3.9	Repräsentationsform ‚Text-Bild‘ anwenden
3.1.3.10	Repräsentationsform ‚Text-Symbol-Bild‘ anwenden
3.2	Inferenzen, die dem Aufbau eines Situationsmodells dienen
3.2.1	Schlussfolgerungen unter Verwendung der in den Aufgaben gegebenen Informationen
3.2.1.1	Text
3.2.1.2	Symbol
3.2.1.3	Text – Symbol
3.2.2	Notationen
3.2.3	Diagnose eigener Fehler beim Elaborieren nach 3.2.1 bis 3.2.2
3.2.3.1	Diagnose mittels Text

- 3.2.3.2 Diagnose mittels Symbol
- 3.2.3.3 Diagnose mittels Zusammenhang zwischen Text und Symbol
- 3.3 Inferenzen, die über Text und Symbol hinausgehen
- 3.3.1 Zweifel am Text/Symbol
- 3.3.2 Inhaltliche Bewertung des Textes/Symbols
- 4. Reduktion von Detailwissen durch Streichung
- 4.1 Schwerpunktsetzungen
- 4.1.1 Schwerpunktsetzung Text
- 4.1.2 Schwerpunktsetzung Symbol
- 4.1.3 Schwerpunktsetzung Text – Symbol
- 4.2 Detailreduktion
- 4.2.1 Detailreduktion Text
- 4.2.2 Detailreduktion Symbol
- 4.3 Text- und/oder Symbolzusammenfassungen

Tabelle A21. Deduktive Kategorienentwicklung von KAT 1 zu Stoff- und Teilchenebene sowie KAT 2 zur chemischen Fachsprache mit zugehörigen Anzahlen der Subkategorien und Übernahmen bzw. Anpassungen.

Ursprüngl. Haupt-/Unterkategorien (nach Kroß & Lind, 2001 und Lind et al., 2004)	Deduktive Kategorienbildungen	
	KAT 1: Ausdifferenziert für Stoff-Teilchenebene	KAT 2: Ausdifferenziert für chem. Fachsprache
1. Hinzufügen von Wissens-elementen d. Abruf zugehörigen Wissens aus dem Gedächtnis		
1.1 Nennung von Wissens-elementen (nicht gerade behandelter Aufgabe)	4 Subkategorien	3 Subkategorien
1.2 Suche nach Beziehungen	4 Subkategorien	4 Subkategorien
1.3 Nachschlagen und nochmals lesen	4 Subkategorien	4 Subkategorien
2. Vergeblicher Abruf von Vorwissen	Single-Kategorie	-
3. Hinzufügen von Wissen durch Wissenserzeugung mittels (logischer) Inferenzen		
3.1 Inferenzen (Aufbau von Textbasis)	<i>Formulierungsänderung: Textbasis/ ment. Vorst.</i>	
3.1.1 Paraphrasierungen	2 Subkategorien	6 Subkategorien
3.1.2 Herstellen von Beziehungen	Single-Kategorie	Single-Kategorie
3.1.3 Lösungswege beschreiben	5 Subkategorien	10 Subkategorien
3.2 Inferenzen (Aufbau Situationsmodell)	<i>Übernahme</i>	
3.2.1 Schlussfolgerungen	3 Subkategorien	3 Subkategorien
-	3 neue Subkategorien	-
3.2.6 Diagnose eigener Fehler	3 Subkategorien	3 Subkategorien
-	Neue Subkategorie	Neue Subkategorie
3.3 Weiterführende Inferenzen	<i>Formulierungsänderung: Inferenzen, die über Stoff- und Teilchenebene/ (M)ER hinausgehen</i>	
3.3.1 Bemerkung zum method. Vorgehen	Übernahme ohne Änderung	-
-	Neue Subkategorie	-
3.3.3 Zweifel an den Inhalten	Single-Kategorie	Single-Kategorie

3.3.4 Inhaltliche Bewertung der Inhalte	Single-Kategorie	Single-Kategorie
-	Neue Subkategorie	-
<hr/>		
4. Reduktion von Detailwissen durch Streichung		
4.1 Zieldefinitionen	Single-Kategorie	Single-Kategorie
4.2 Schwerpunktsetzungen	3 Subkategorien	3 Subkategorien
4.3 Detailreduktion	3 Subkategorien	2 Subkategorien
4.4 Textzusammenfassungen	Single-Kategorie	Single-Kategorie
<hr/>		
5. Oberflächenelaboration		-
5.1 Kontrolle von Textmerkmalen	Übernahme ohne Änderung	
<hr/>		
6. Monitoring Statements		-
6.1 VERständnis Statements	Übernahme ohne Änderung	
6.2 MISverständnis Statements	Übernahme ohne Änderung	
6.3 Neues und Interesse		
6.4 Umgang mit dem Text		
<hr/>		
7. Restkategorie		-
7.1 Verbalisierungen (ohne them. Zusammenhang)		
7.2 Verbalisierungen (im them. Zusammenhang, keine eindeutige Kategorie)	Übernahme ohne Änderung	
7.3 Wortgetreue Wiederholung		
<hr/>		

A.3.2.1 Finales Kategoriensystem zum Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis (KAT 1)

Name der Kategorie	Beschreibung	Exemplarisches Ankerbeispiel
1.1 Nennung von Wissensselementen, die nicht in der gerade behandelten Aufgabe behandelt werden		
1.1.1 Aus einer vorherigen Aufgabe auf Teilchenebene	Die Vp. ruft Informationen zur Teilchenebene ab, die in vorherigen Aufgaben gegeben wurden (wenn die abgerufene Information in der gleichen Aufgabe liegt, wird dies nicht codiert). Vp. benennt explizit über die Inhalte der Aufgabe hinausgehende chemische Sachverhalte zur Teilchenebene, wenn nur implizit von diesen gebraucht gemacht wird, erfolgt keine Codierung.	<i>„mit der Katode, habe ich jetzt auch wieder gelernt.“</i>
1.1.2 Aus einer vorherigen Aufgabe auf Stoffebene	Die Vp. ruft Informationen zur Stoffebene ab, die in vorherigen Aufgaben gegeben wurden (wenn die abgerufene Information in der gleichen Aufgabe liegt, wird dies nicht codiert). Vp. benennt explizit über Inhalte der Aufgabe hinausgehende chemische Sachverhalte zur Stoffebene, wenn nur implizit von diesen gebraucht gemacht wird, erfolgt keine Codierung.	
1.1.3.1 Aus dem Vorwissen (Inhalte auf Teilchenebene)	Die Vp ruft in ihren Äußerungen Informationen zu Stoff- und Teilchenebene ab, die aus ihrem Vorwissen stammen, d.h. die nicht der Aufgabe zu entnehmen sind. Dabei handelt es sich um Inhalte auf Teilchenebene)	<i>„Also allgemein Säuren geben ja Protonen ab. Und Basen nehmen Protonen auf.“</i>
1.1.3.2 Aus dem Vorwissen (Inhalte auf Stoffebene)	Die Vp ruft in ihren Äußerungen Informationen zu Stoff- und Teilchenebene ab, die aus ihrem Vorwissen stammen, d.h. die nicht der Aufgabe zu entnehmen sind. Dabei handelt es sich um Inhalte auf Stoffebene)	<i>„Bei Kupfer-Sulfat ist es ja so, dass man das auch immer schön in der blauen Farbe sieht.“</i>

1.1.4 Aus Lernumgebung auf Stoffebene

„Hier ist wieder ganz wichtig, dass natürlich auf der Stoffebene das ganze in einem U-Rohr, zum Beispiel, zu sehen ist.“

1.1.5 Aus Lernumgebung auf Teilchenebene

„Da würde ich dann gucken, dass ich das auch nochmal genauer auf Elektronenebene, zum Beispiel mit der VR, AR Brille machen würde.“

1.2 Suche nach Beziehungen

1.2.1 auf Teilchenebene

Die Äußerungen der Vp. lassen erkennen, dass sie (ohne Erfolg) versucht Beziehungen, die zum Lösen der Aufgabe erscheinen, mithilfe der Repräsentationsformen auf Teilchenebene (in Form von Formelsprache, Bild oder Text) herzustellen. Es werden dabei Wissens- bzw. Textlücken oft in Frageform aufgedeckt.

„Also in der Schmelzzone. Wie war denn das jetzt nochmal? C plus CO₂. Vorwärmzone, glaube ich, war 2CO reagiert zu Kohlenstoff und CO₂.“

1.2.2 auf Stoffebene

Die Äußerungen der Vp. lassen erkennen, dass sie (ohne Erfolg) versucht Beziehungen, die zum Lösen der Aufgabe erscheinen, mithilfe der Repräsentationsformen auf Stoffebene (in Form von Formelsprache, Bild oder Text) herzustellen. Es werden dabei Wissens- bzw. Textlücken oft in Frageform aufgedeckt.

„Ich habe jetzt hier ein Problem, weil hier so...drei steht. Warum drei? Also wir sprechen jetzt von einer Stoffebene, also Schwermetall Quecksilber, auch ein Stoff, also ein Stoff kann Reduktionsmittel sein, finde ich.“

1.2.3.1 mit dem Vorwissen auf Stoffebene

Die Äußerungen der Vp. lassen erkennen, dass sie (ohne Erfolg) versucht Beziehungen die zum Lösen der Aufgabe wichtig erscheinen, mithilfe des eigenen Wissens herzustellen. Es werden dabei Wissens- bzw. Textlücken oft in Frageform aufgedeckt. Dabei handelt es sich um Inhalte auf Stoffebene.

„Vielleicht muss auf der anderen Seite, ich überlege gerade, mit welchem Metall ich das immer gemacht habe. Zum Beispiel nimmt man typischerweise einen Kupferüberzug und dann hat man eine Kupfersulfatlösung und eine Kupferelektrode, deswegen wäre es vielleicht sinnvoll eine Chromelektrode zu nehmen, jetzt bin ich mir gerade nicht sicher, ob eine Chrom, also, ob Chrom, wie das quasi metallisch ist von den Eigenschaften.“

<p>1.2.3.2 mit dem Vorwissen auf Teilchenebene</p>	<p>Die Äußerungen der Vp. lassen erkennen, dass sie (ohne Erfolg) versucht Beziehungen die zum Lösen der Aufgabe wichtig erscheinen, mithilfe des eigenen Wissens herzustellen. Es werden dabei Wissens- bzw. Textlücken oft in Frageform aufgedeckt. Dabei handelt es sich um Inhalte auf Teilchenebene.</p>	<p><i>„Und in der Vorwärmzone weiter oben hast du dann zwei CO reagiert zu-. (6 Sek.) Da müsste eigentlich Kohlenmonoxid rauskommen, ja zu CO zwei. Ja. Zu CO zwei plus Kohlenstoff oder irgend sowas, ja?“</i></p>
<p>2. Vergeblicher Abruf von Vorwissen/Information aus dem Gedächtnis</p>	<p>Die Vp. sucht vergeblich nach Vorwissen zu Stoff- und Teilchenebene aus dem Gedächtnis.</p>	<p><i>„Ah, ich kriege es echt nicht mehr zusammen. Ich habe keine Ahnung, wie ein Hochofen aufgebaut ist.“</i></p>
<p>3.1 Inferenzen, die dem Aufbau einer Text-/Symbol-/Bildbasis dienen mit Einfluss auf den adäquaten Umgang der Fachsprache</p>		
<p>3.1.1.1 von Repräsentationsform auf Teilchenebene</p>	<p>Die Vp. betrachtet die Repräsentationen in der Aufgabe und beschreibt die in der Aufgabe gegebenen Inhalte auf Teilchenebene. Dabei werden jedoch keine weiteren Informationen verarbeitenden Prozeduren angewandt.</p>	<p><i>„Denn das Cyanidin ist jetzt hier in letztendlich drei verschiedenen Formen vorliegend, die alle in einem chemischen Gleichgewicht vorliegen.“</i></p>
<p>3.1.1.2 von Repräsentationsform auf Stoffebene</p>	<p>Die Vp. betrachtet die Repräsentationen in der Aufgabe und beschreibt die in der Aufgabe gegebenen Inhalte auf Stoffebene. Dabei werden jedoch keine weiteren Informationen verarbeitenden Prozeduren angewandt.</p>	<p><i>„Wenn ich das Wort Salz sage, bin ich eigentlich auch schon wieder auf der Stoffebene.“</i></p>
<p>3.1.2 Herstellen von Beziehungen zwischen Teilchen- und Stoffebene</p>	<p>Die Vp. bringt aufgrund inhaltlicher Kriterien Informationen, die unterschiedlichen Ebenen zugeordnet werden können, also einmal der Teilchenebene und einmal der Stoffebene, in einen Zusammenhang. Wenn ein Text/Symbol nur angesehen wird, dann Codierung 1.3.</p>	<p><i>„Die Größe des delokalisierten Elektronensystems beeinflusst dann die Farbe des absorbierten Lichts und damit auch die Farbe des Erscheinungsbildes von diesem Stoff.“</i></p>

3.1.3 Lösungswege beschreiben	Die Vp. beschreibt, benennt oder kommentiert die Methoden (u.a. Anwenden wissenschaftlicher Methoden), den Lösungsweg als Ganzes oder die Vorgehensweise im Einzelnen, die sie bei der Bearbeitung eines Problems benutzt oder andenkt.	
3.1.3.1 Teilchenebene wählen	Die Vp beschreibt, benennt oder kommentiert die Methoden, den Lösungsweg mithilfe der in der Aufgabe angeführten Inhalte auf Teilchenebene.	<i>„Da wäre ich dann bei Blei Plus CO und dann hätte ich-, oder PBO Zwei Plus CO. Also Kohlenstoffmonoxid und dann wäre ich bei Blei und Kohlenstoffdioxid.“</i>
3.1.3.2 Stoffebene wählen	Die Vp beschreibt, benennt oder kommentiert die Methoden, den Lösungsweg mithilfe der in der Aufgabe angeführten Inhalte auf Stoffebene.	<i>„Also es müsste sich auf der Stoffebene um Pulver handeln, die dann miteinander reagieren in einer Redoxreaktion.“</i>
3.1.3.3 Teilchenebene anwenden	Die Vp nutzt für die Beschreibung, Benennung oder Kommentierung der Methode, des Lösungswegs die Teilchenebene.	<i>„Gut. Bei der Reaktion von Metall mit nicht Metallen bei dem Beispiel die Bildung von Natriumchlorid fange ich jetzt einfach an und zeichne mal die Metallstruktur von Natrium sehr schematisch. (6 Sek.) Und natürlich ein Chlormolekül. (5 Sek.) Genau. Ich suche das jetzt mal hier auf Teilchenebene darzustellen. (6 Sek.)“</i>
3.1.3.4 Stoffebene anwenden	Die Vp nutzt für die Beschreibung, Benennung oder Kommentierung der Methode, des Lösungswegs die Stoffebene.	<i>„und auch hier wieder gleiche Erklärung. Erstmal den Versuch durchführen, um die Stoffebene sichtbar machen zu können. Man kann das Bleidioxid erstmal zeigen als Salz. Man kann Holzkohle, also fast reinen Kohlenstoff (Schulklingel) erstmal demonstrieren. Und nach Durchführung der Reaktion sieht man, dass ein ganz entsteht, Kohlenstoffdioxid, und elementares Blei, das eben auch in seiner Farbe und Form sichtbar gemacht werden kann.“</i>

3.1.3.5 Stoff- und Teilchenebene anwenden	Die Vp nutzt für die Beschreibung, Benennung oder Kommentierung der Methode, des Lösungswegs Stoff- und Teilchenebene (v.a. Wechsel ineinander).	<i>„Ich würde das versuchen, klarer zu trennen. Also dass man halt wirklich sagt: "Okay, das ist meine Beobachtung auf Stoffebene und jetzt gucken wir auf die Teilchenebene und erklären das dann nochmal." (6 Sek.)“</i>
3.1.4 Zweifel an den Inhalten mit Blick auf Stoff- und Teilchenebene	Wahrnehmen von Ungereimtheiten, diffus weil keine fachliche Begründung der Vp. für diesen Zweifel vorliegt. Die Äußerungen der Vp. lassen erkennen, dass sie an dem von ihr getätigten Aussagen hinsichtlich Stoff- und Teilchenebene zweifelt, unsicher ist, ob es richtig ist, ohne dass jedoch ein Widerspruch oder Fehler klar zu benennen wäre.	<i>„Ja, jetzt glaube ich, habe ich ziemlich durcheinander erklärt und nie zwischen Stoff und Teilchen ebene so richtig unterschieden.“</i>
3.1.5 Inhaltliche Bewertung der Stoff- und Teilchenebenen 3.1.5.1 die Teilchenebene	Die Vp. kommentiert entweder wertend oder im Hinblick auf ihre Beschaffenheit das Wesen (Struktur, Gehalt, Wert, Aussagekraft) und/ oder den Inhalt einer Information. Dabei fokussiert die Vp. Die Teilchenebene.	<i>„Also ich muss ehrlich sagen, ich glaube ich würde, also das Beispiel ist, doch eigentlich bisschen schlecht. Es ist schlecht wasserlöslich, weil es ein Sulfat ist. Aber gut.“</i>
3.1.5.2 die Stoffebene	Die Vp. kommentiert entweder wertend oder im Hinblick auf ihre Beschaffenheit das Wesen (Struktur, Gehalt, Wert, Aussagekraft) und/ oder den Inhalt einer Information. Dabei fokussiert die Vp. Die Stoffebene.	<i>„Also zunächst einmal sind die nicht aquatisiert. Das sind einfach, das ist eine Schmelze.“</i>
3.1.5.1 die Stoff-Teilchenebene	Die Vp. kommentiert entweder wertend oder im Hinblick auf ihre Beschaffenheit das Wesen (Struktur, Gehalt, Wert, Aussagekraft) und/ oder den Inhalt einer Information. Dabei fokussiert die Vp. Die Stoff-Teilchenebene.	<i>„also die Kupfer Ionen des Kupferoxids und die Kupferatome wird hier der Stoffname benannt und dann aber auch auf Teilchenebene die Ionen nochmal benannt und auch die Ladung mit angegeben.“</i>

3.2 Inferenzen, die dem Aufbau eines Situationsmodells dienen

3.2.1 Schlussfolgerungen auf Stoff- und Teilchenebene unter Verwendung der in den Aufgaben gegebenen Informationen

Die Vp. setzt die gegebenen Informationen auf Stoff- und/oder Teilchenebene in Beziehung durch das Ableiten logischer Schlüsse in Form von `Wenn das so ist, dann folgt daraus ...` oder in Form von Erklärungen eines Sachverhaltes. Diese logischen Inferenzen dienen alle dem Nachvollziehen der Stoff- und Teilchenebenen, das im Wesentlichen kleinschrittig erfolgt. Sollten die dabei in Beziehung gesetzten Informationen jedoch weiter zurückliegen, wird dies durch eine zusätzliche Codierung in die Kategorie 1.1.1 deutlich. Die Wahl der Repräsentationsform auf Teilchen- oder Stoffebene sowie Stoff-Teilchen-Ebenenwechsel sind hierfür entscheidend.

3.2.1.1 Schlussfolgerungen auf Teilchenebene (Codierung, nur wenn eindeutig)

Die Vp. schlussfolgert explizit unter Berücksichtigung der Teilchenebene. Es wird ein Sachverhalt bewusst mittels Teilchenebene ausgedrückt. Die Vp. leitet sich so Zwischenschritte bei der Bearbeitung von Sachverhalten her, die in der Aufgabe gegeben sind.

„Also das Eisen wird ja reduziert plus drei Elektronen pro Atom. Und das Kohlenstoff muss dann oxidiert werden plus vier, von zwei auf vier. Dann minus zwei Elektronen pro Atom.“

3.2.1.2 Schlussfolgerungen auf Stoffebene (Codierung, nur wenn eindeutig)

Die Vp. schlussfolgert explizit unter Berücksichtigung der Stoffebene. Es wird ein Sachverhalt bewusst mittels Stoffebene ausgedrückt. Die Vp. leitet sich so Zwischenschritte bei der Bearbeitung von Sachverhalten her, die in der Aufgabe gegeben sind.

„Wenn ich das Ganze jetzt eindampfen würde, dann hätte ich tatsächlich in fester Form das Salz NH_4Cl .“

3.2.1.3 Schlussfolgerungen auf Stoff- und Teilchenebene (Codierung, nur wenn eindeutig)

Die Vp. schlussfolgert explizit unter Berücksichtigung der Stoff- und Teilchenebene (v.a. deren Wechsel ineinander). Es wird ein Sachverhalt bewusst mittels Stoff- und Teilchenebene ausgedrückt. Die Vp. leitet sich so Zwischenschritte bei der Bearbeitung von Sachverhalten her, die in der Aufgabe gegeben sind.

„Also je nachdem, ob ich in einer sauren Lösung arbeite, oder in einer basischen Lösung, kann das Cyanidin ein Proton abgeben, oder ein Proton aufnehmen. Also das kann sowohl als Säure, oder auch als Base fungieren.“

- 3.2.2 Ergebnis nennen Die Vp. nennt ein Ergebnis bzw. ein Zwischenergebnis, insbesondere mit Blick auf Stoff- und Teilchenebene, und liegt damit am Ende eines Lösungsabschnittes. Evtl. unterscheidet sie später zwischen richtigem und falschem Ergebnis (nicht doppelt codieren mit Schlussfolgern). „Und generell würde ich in einer Ebene versuchen, zu bleiben.“
- 3.2.3 Inhaltliche Fragen an sich selbst Die Vp. äußert eine fachliche Frage, die sie sich selbst stellt und die sich mit dem Lösen des Problems befasst. (Äußerungen, die eher Monitoringcharakter haben (Die Vp. äußert ihr Unverständnis oder ihre Unklarheit bezogen auf konkret benannte inhaltliche Sachverhalte), fallen nicht unter diese Kategorie → Monitoring) „Woran erkennen wir, dass es eine Redoxreaktion ist?“
- 3.2.4 Nennung eines selbst erdachten Teilproblems Die Vp. nennt selbst erdachte Teilprobleme, die mutmaßlich für die angestrebte Problemlösung nützlich erscheinen und von ihr als lösbar eingeschätzt werden. Es handelt sich dabei um nicht in der Aufgabe gefragte Probleme und prinzipiell auch eher nicht für die Lösung relevante Probleme. Das eigentliche Problem ist zu diesem Zeitpunkt der Vp. im Allgemeinen noch unzugänglich. Es wird nicht unterschieden zwischen gelösten und ungelösten Teilproblemen, da meist nur deren Irrelevanz festgestellt wird. „und da fängt es nämlich jetzt schon an. Das Salz, wenn sich die Säure eben in Wasser löst, dann kommt plötzlich ein Oxoniumionen. Und da steigen die Schüler meistens dann aus, weil sie sagen, woher kommt denn jetzt plötzlich das Oxoniumion.“
- 3.2.5 Diagnose eigener Fehler beim Elaborieren nach 3.2.1 bis 3.2.4 Die Vp. hat während des vorangegangenen Lernens Schlussfolgerungen oder Ergebnisse entwickelt, deren Richtigkeit sie jetzt in Frage stellt. Dazu kann sie Vorwissen nutzen, welches ihr nun einfällt, oder Informationen, die sie gerade erst in der Aufgabe findet.

3.2.5.1 Diagnose mittels Teilchenebene	Die Vp. fokussiert für die Diagnose der bisherigen Schlussfolgerungen die Teilchenebene.	<i>„Über der Reduktion von der Kupferionen entstehen vermutlich Kupferatome in erster Linie, weil sonst hätte ich nämlich jetzt hier-. Haha, jetzt habe ich einen Fehler bei mir gefunden. Sonst hätte ich nämlich jetzt natürlich auch wieder eine Vermischung der Stoff- und Teilchenebene, das heißt, bei der Reduktion der Kupferionen entstehen in ... #00:21:49# erstmal Kupferatome.“</i>
3.2.5.2 Diagnose mittels Stoffebene	Die Vp. fokussiert für die Diagnose der bisherigen Schlussfolgerungen die Stoffebene.	<i>„Also nicht der Farb- nein der Farbstoff wird rot gesehen dann. Also die Farbe wird rotgesehen“</i>
3.2.5.3 Diagnose mittels Stoff- und Teilchenebene	Die Vp. fokussiert für die Diagnose der bisherigen Schlussfolgerungen Stoff- und Teilchenebene (v.a. deren Wechsel ineinander).	<i>„also tausche ich Anode und Kathode, so dass die Elektronen, der Elektronenüberschuss am Eisenschlüssel ist und sich die Chromkationen dort eben anlagern und miteinander reagieren“</i>
3.2.5.4 Wahrnehmen von Widerspruch	Die Vp. bemerkt, dass ein Widerspruch besteht zwischen mehreren von ihr gemachten Aussagen, zwischen ihren Aussagen und Informationen aus der Aufgabenstellung oder zwischen ihren Aussagen und abgerufene Informationen aus dem Vorwissen. Dies ist in der Regel die Vorstufe dazu, einen Fehler zu entdecken und ein (Zwischen-) Ergebnis zu verwerfen. Insbesondere Widersprüche bezüglich der Aussagen zu Stoff- und Teilchenebene sowie deren Wechsel ineinander sollen codiert werden.	<i>„Aha, gerade merke ich, dass ich Quatsch geredet habe. Oh, okay. (lacht) Also Schwachsinn, okay, alles Denkfehler. Der letzte Teil war falsch. Ich habe mich so auf das Modell konzentriert und auf das Ergebnis, dass ich erstmal das andere aus dem Blick verloren habe.“</i>
3.3 Inferenzen, die über Stoff- und Teilchenebene hinausgehen		

3.3.1 Bemerkungen zum methodischen Vorgehen	Die Vp. stellt Annahmen auf, die als Vorbedingung für das weitere Vorgehen gelten sollen und insofern methodischer (nicht inhaltlicher) Natur sind. Vorwiegend Fallunterscheidungen, die zur weiteren Elaboration mit der Stoff- und Teilchenebene unter Berücksichtigung einer adäquaten Fachsprache sinnvoll sind.	<i>„Bei PbO₂, da fängt man jetzt erst mal mit dem Sauerstoffteilchen an“</i>
3.3.2 Eigene weiterführende Gedanken	Die Vp. äußert Annahmen inhaltlicher Natur, deren Aussage über die in den Repräsentationen gegebenen und selbst eingebrachten Informationen und deren bloßes Nachvollziehen z.B. in Form von Schlussfolgerungen hinausgeht.	<i>„Sondern die Raumlufte spielt da wahrscheinlich schon auch entsprechend mit.“</i>
3.3.3 Äußerungen die Unsicherheit ausdrücken	Die Vp. hinterlässt einen unsicheren Eindruck. Dabei werden Aussagen bezogen auf den Inhalt einer Information bzw. auf die gegebenen Darstellungsformen (→ Stoff- und Teilchenebene) berücksichtigt.	<i>„Ja, jetzt glaube ich, habe ich ziemlich durcheinander erklärt und nie zwischen Stoff und Teilchenebene so richtig unterschieden.“</i>
4.1 Zieldefinitionen	Die Vp. erklärt, worauf es in der jeweiligen Sinneinheit, Textpassage/ Symbolschreibweise oder Abschnitt ankommt. Sie definiert Zielstellungen, die für die Aufgabenlösung, insbesondere mit Blick auf den Stoff-Teilchen-Ebenenwechsel, möglicherweise bedeutsam sind.	<i>„Ziel des Hochofenprozesses ist die Gewinnung von elementarem Eisen aus Eisen(III)-oxid.“</i>
4.2 Schwerpunktsetzungen	Die Vp. misst einem bestimmten Sachverhalt (auch wenn dieser nicht in der Aufgabenstellung steht; eigene Gedanken sind ebenso bedeutsam) eine besondere Bedeutung bei und sagt dies auch explizit. Sie betont bestimmte Inhalte während der Elaboration. Die Vp. unterstreicht einzelne Wörter, Sätze, Abschnitte, Bilder, Symbole oder Teile davon bzw. streicht an oder umkreist sie, notiert sie. Die Codierung erfolgt unter anderem anhand der bearbeiteten Aufgabenblätter.	<i>„Das ist jetzt sozusagen die Teilchenebene. Wenn ich auf Teilchenebene das beschreibe, dazu kann man wunderbar Repräsentationsform Bild und Symbol nutzen. (6 Sek.)“</i>

4.2.1 Schwerpunktsetzung Teilchenebene	Die Vp. misst der Teilchenebene eine besondere Bedeutung bei und sagt dies auch explizit. Sie betont bestimmte Notationen während der Elaboration.	<i>„Und Wasser, auch hier wieder, und Wasser. Müsste dann eigentlich Wassermoleküle sein, um es auf Teilchenebene runterzubringen.“</i>
4.2.2 Schwerpunktsetzung Stoffebene	Die Vp. misst der Stoffebene eine besondere Bedeutung bei und sagt dies auch explizit. Sie betont bestimmte Notationen während der Elaboration.	<i>„Die stoffliche Ebene unterscheidet sich also von der Teilchenebene dadurch, dass ich auf stofflicher Ebene erst einmal nur die Stoffe und ihre Farben und ihren Zustand beschreibe.“</i>
4.2.3 Schwerpunktsetzung Stoff-Teilchen-Ebenenwechsel	Die Vp. misst dem Stoff-Teilchen-Ebenenwechsel eine besondere Bedeutung bei und sagt dies auch explizit. Sie betont bestimmte Notationen während der Elaboration.	<i>„Also auf der Stoffebene sieht man eben, dass auf dem einen Schlüssel sich eine Chromschicht ablagert. Und auf Teilchenebene würden die Chromionen zum Schlüssel diffundieren und dort die Ionen, die Sulfationen abgeben, dann aufnehmen.“</i>
4.3 Detailreduktion	Die Vp. hält Informationen und Details innerhalb einer Sinneinheit für überflüssig. Die Vp. streicht einzelne Wörter, Sätze, Abschnitte, Symbole oder Teile davon durch. Die Codierung erfolgt unter anderem anhand der bearbeiteten Aufgabenblätter der Vp.	
4.3.1 Detailreduktion Teilchenebene	Die Vp. hält die Betrachtung der Teilchenebene in einer Aufgabe für überflüssig. Die Vp. betont dies.	<i>„Hg²⁺ würde ich auch eher weglassen tatsächlich.“</i>
4.3.2 Detailreduktion Stoffebene	Die Vp. hält die Betrachtung der Stoffebene in einer Aufgabe für überflüssig. Die Vp. betont dies.	<i>„Also das Glühen von der-, hervorgerufen durch die Oxidation, durch die exotherme Reaktion hat nichts damit zu tun, dass jetzt da Kupferionen zu Kupferatomen reduziert werden, also das Glühen ist völlig Wurst.“</i>

4.4 Text- und/oder Symbolzusammenfassungen	Die Vp. fasst den genannten Text bzw. zumindest große Textabschnitte nachträglich, einzelne Absätze oder Symbole (Reaktionsgleichungen) zwischendurch zusammen. Dies dient vordergründig dem Memorieren wesentlicher Text- oder Symbolinformationen und in erster Linie der Strukturierung von Text- oder Symbolinformationen. Jedes einzeln hervorgehobene Wort/Symbol, jede Wort-/Symbolgruppe oder jeder nochmals benannte Text-/Symbolabschnitt wird einzeln codiert.	<i>„[...] Wir haben eine Gesamtgleichung mit einer Oxidation von Quecksilber, einer Reduktion von Nitrationen und der Redoxgleichung.“</i>
5.1 Kontrolle von Text- oder Symbolmerkmalen	Die Vp. versucht die benutzten Abkürzungen, Symbole oder Fachbegriffe im Text zuzuordnen, d.h. anhand formaler Merkmale wie das Auftreten gleicher Symbole oder des Gebrauchs von gleichen Kennwörtern in unterschiedlichen Sätzen bzw. Abschnitten. Die Vp. verschafft sich einen Überblick über den Umfang der Texte/Symbole (Anzahl der Aufgaben u.ä.) und versucht sich anhand formaler Textmerkmale (z.B. Abbildungsnummern, Aufgabennummern) oberflächlich zu orientieren. Äußerungen, die sich auf inhaltliche (chemische) Sachverhalte des Textes/Symbols beziehen fallen nicht in diese Kategorie.	<i>„Und - kurz vergleichen, wo hier die Unterschiede sind.“</i>
6.1 VERständnis Statements	Die Äußerungen der Vp. drücken Verständnis und Zustimmung aus.	<i>„Okay. Die beziehen sich jetzt darauf, alles klar.“</i>
6.2 MISverständnis Statements	Die Äußerungen der Vp. drücken Unverständnis oder Unwissen aus.	<i>„Sodass - Ich verstehe den Satz nicht.“</i>
6.3 Neues und Interesse	Die Äußerungen der Vp. drücken Interesse, Neugier oder die Tatsache aus, dass etwas für die Vp. Neues im Text oder Symbol steht.	<i>„Stahl. Ach, da geht es um Stahl.“</i>

6.4 Umgang mit dem Text und Symbol hinsichtlich Stoff- und Teilchenebene

Die Vp. äußert, was sie im Folgenden mit der Aufgabe zu tun gedenkt. Die Äußerungen sind inhaltsneutral und beschreiben lediglich Tätigkeiten wie z.B. das muss ich nochmal wiederholen, lesen oder das Symbol schaue ich mir lieber nochmal an.

„Jetzt muss ich mir das mal ganz kurz anschauen.“

7.1 Verbalisierungen, die nicht im thematischen Zusammenhang mit den Aufgaben stehen

Unsinn, z.T. spontane Assoziationen

„Oh mein Gott Laut Denken ist schon eine Herausforderung.“

7.2 Verbalisierungen, die im thematischen Zusammenhang mit den Aufgaben stehen, jedoch nicht eindeutig einer Kategorie zuzuordnen sind.

„Also, solche komplexen Gleichungen kommen bei uns überhaupt nicht vor, in der Realschule. Darum muss ich gucken, inwiefern ich da die Schüleraussagen bewerten kann.“

A.3.2.2 Finales Kategoriensystem zur chemischen Fachsprache (KAT 2)

Name der Kategorie	Beschreibung	Exemplarisches Ankerbeispiel
1.1 Nennung von Wissensselementen, die nicht in der gerade behandelten Aufgabe behandelt werden		
1.1.1 Aus dem Text	Die Vp. ruft aus dem Gedächtnis Informationen ab, die im Text in vorherigen Aufgaben gegeben wurden (wenn die abgerufene Information in der gleichen Aufgabe liegt, wird dies nicht codiert). Vp. benennt explizit über den Text hinausgehende chemische Sachverhalte, wenn nur implizit von diesen gebraucht gemacht wird, erfolgt keine Codierung. Es handelt sich dabei um Fachbegriffe (Bsp.: Reduktionsmittel) usw.	<i>„Die Ammoniumionen und die Chloridionen schließen sich wie in Testaufgabe eins schon dargelegt zu einem Ionengitter zusammen“</i>
1.1.2 Aus dem Symbol	Die Vp. ruft aus dem Gedächtnis Informationen ab, die in den Symbolen in vorherigen Aufgaben gegeben wurden (wenn die abgerufene Information in der gleichen Aufgabe liegt, wird dies nicht codiert). Vp. benennt explizit über die Symbole hinausgehende chemische Sachverhalte, wenn nur implizit von diesen gebraucht gemacht wird, erfolgt keine Codierung. Es handelt sich dabei um chemische Notationen (Abkürzungen; Bsp.: aq.) usw.	
1.1.3 Aus der AR- bzw. Video-Lernumgebung	Die Vp. ruft aus dem Gedächtnis Informationen ab, die offensichtlich der AR- bzw. Video-Lernumgebung entnommen werden (wenn die abgerufene Information in der Testaufgabe liegt, wird dies nicht codiert). Vp. benennt explizit über die Aufgaben hinausgehende chemische Sachverhalte, wenn nur implizit von diesen gebraucht gemacht wird, erfolgt keine Codierung.	<i>„Wir haben das bei dem Experiment mit dem Zinkdioxid gesehen, wie sich (Tonstörung)- oder angehängt hat. Entsprechend haben wir das jetzt auch mit dem Eisenschlüssel, der eben eine Kathode wird“</i>

1.1.4 Aus dem Vorwissen	Die Vp. ruft in ihren Äußerungen Informationen ab, die aus ihrem Vorwissen stammen, d.h. die nicht dem Text oder Symbol der Aufgabe zu entnehmen sind.	<i>„Bei der Oxidation werden Elektronen abgegeben. Bei der Reduktion werden sie aufgenommen.“</i>
1.2 Suche nach Beziehungen 1.2.1 mit dem Text	Die Äußerungen der Vp. lassen erkennen, dass sie (ohne Erfolg) versucht Beziehungen, die zum Lösen der Aufgabe wichtig erscheinen, mithilfe des Textes herzustellen. Es werden dabei Wissens- bzw. Textlücken oft in Frageform aufgedeckt.	<i>„So, ich bin gerade am überlegen, in welcher Reihenfolge die Zonen vorkommen. (10 Sek.) Und ob das in der Teilgleichungssumme was ausmacht, irgendwie macht das gerade in meinem Kopf nicht allzu viel Sinn“</i>
1.2.2 mit dem Symbol	Die Äußerungen der Vp. lassen erkennen, dass sie (ohne Erfolg) versucht Beziehungen, die zum Lösen der Aufgabe erscheinen, mithilfe des Symbols herzustellen. Es werden dabei Wissens- bzw. Textlücken oft in Frageform aufgedeckt.	<i>„Wo sehe ich jetzt ein Kation? Das wäre jetzt hier im Prinzip komplett auf der linken Seite.“</i>
1.2.3 mit der AR- bzw. Video-Lernumgebung	Die Äußerungen der Vp. lassen erkennen, dass sie (ohne Erfolg) versucht Beziehungen die zum Lösen der Aufgabe wichtig erscheinen, mithilfe den Informationen aus der Lernumgebung herzustellen. Es werden dabei Wissens- bzw. Textlücken oft in Frageform aufgedeckt.	
1.2.4 mit dem Vorwissen	Die Äußerungen der Vp. lassen erkennen, dass sie (ohne Erfolg) versucht Beziehungen die zum Lösen der Aufgabe wichtig erscheinen, mithilfe des eigenen Wissens (in Form von Formelsprache, Bild oder Text) herzustellen. Es werden dabei Wissens- bzw. Textlücken oft in Frageform aufgedeckt.	<i>„Ja, da habt ihr mich. Weiß ich nicht mehr ganz genau, ob das dann alles in einer Lösung schwimmen kann, oder ob das räumlich getrennt sein muss.“</i>

1.3 Nachschlagen und nochmals lesen

1.3.1 Text aus vorherigen Aufgaben

Die Vp liest einzelne Textpassagen nochmals, die mindestens eine vorherige Aufgabe zurückliegen (sinngemäßes Überfliegen ohne das strukturierende Gedanken bzw. Memoriertechniken explizit angewandt werden → dann 4.4).

1.3.2 Im Symbol aus vorherigen Aufgaben

Die Vp liest/betrachtet einzelne Symbole nochmals, die mindestens eine vorherige Aufgabe zurückliegen (sinngemäßes Überfliegen ohne das strukturierende Gedanken bzw. Memoriertechniken explizit angewandt werden → dann 4.4). Und betrachtet dabei besonders Summenformeln/Partikelformen/Reaktionsgleichungen

1.3.3 Im Text zu der gerade behandelten Aufgabe

Die Vp liest einzelne Textpassagen nochmals, die in der gleichen Aufgabe gelegen sind (sinngemäßes Überfliegen ohne das strukturierende Gedanken bzw. Memoriertechniken explizit angewandt werden → dann 4.4).

„Findet ausschließlich zwischen Cu^{2+} und Fe-Atomen statt durch eine Übertragung der Elektronen.“

1.3.4 Im Symbol zu der gerade behandelten Aufgabe

Die Vp liest/betrachtet einzelne Symbole nochmals, die in der gleichen Aufgabe gelegen sind (sinngemäßes Überfliegen ohne das strukturierende Gedanken bzw. Memoriertechniken explizit angewandt werden → dann 4.4).

3.1 Inferenzen, die dem Aufbau einer Text-/Symbol-/Bildbasis dienen

3.1.1 Paraphrasieren zwischen den Repräsentationsformen

Bei der Paraphrasierung werden keine weiteren Informationen verarbeitenden Prozeduren angewandt.

3.1.1.1 aus Text in Text	Die Vp. beschreibt die in der Aufgabe gegebenen Texte mit eigenen Worten. Dazu gehört die Umformulierung von Textpassagen mit eigenen Worten.	<i>„Also es reagiert ein Salz mit einem elementaren Nichtmetall zu einem Metall und einem Molekül.“</i>
3.1.1.2 aus Text in Symbol	Die Vp. beschreibt die in der Aufgabe gegebenen Texte mit Symbolen. Dazu gehört die Umformulierung von Textpassagen in Symbolschreibweisen.	<i>„Also Natrium als Element, Chlor als Element und reagiert zu Natriumchlorid als Salz. Und dann gleichen wir das Ganze aus. (5 Sek.) Und haben dann zwei Stoffportionen Natrium mit einer Stoffportion Chlor, die zu zwei Stoffportionen Natriumchlorid reagieren“</i>
3.1.1.3 aus Text in Bild	Die Vp. beschreibt die in der Aufgabe gegebenen Texte mit Bildern. Dazu gehört die Umformulierung von Textpassagen in bildliche Darstellungen.	<i>„das heißt, ich würde, um den Versuchsaufbau zu zeichnen, einen Schlüssel letztendlich erst mal zeichnen, der ist ja vorgegeben. Und dann ein entsprechendes Gefäß außen rum. Dann taucht dieser Schlüssel in eine Lösung ein“</i>
3.1.1.4 aus Symbol in Text	Die Vp. beschreibt die in der Aufgabe gegebenen Symbole mit eigenen Worten. Dazu gehört die Umformulierung von Symbolen in bildliche Darstellungen.	<i>„Also auf Stoffebene wird ein Salz mit Kohlenstoff umgesetzt.“</i>
3.1.1.5 Aus Symbol in Bild	Die Vp. beschreibt die in der Aufgabe gegebenen Symbole mit Bildern. Dazu gehört die Umformulierung von Symbolen in bildliche Darstellungen.	
3.1.2 Herstellen von Beziehungen zwischen unterschiedlich repräsentierender Information	Die Vp. bringt aufgrund inhaltlicher Kriterien Informationen, die unterschiedlich repräsentiert sind, also einmal als Symbol und einmal als Text, in einen Zusammenhang. Wenn ein Text/Symbol nur angesehen wird, dann Codierung 1.3.	<i>„Genau. Und wenn das jetzt mit Säure aus Äpfeln oder Essig oder Wein-. Ah, ja. Okay. Also wenn es protoniert wird, das Cyanidin, was hat sich da geändert? Dann wird noch das Carbonylsauerstoff-Atom protoniert und trägt dann eine positive Ladung. Das heißt, auf Teilchenebene-. (14 Sek.) Da sind freie Elektronenpaare am Carbonylsauerstoff und dann ist da nur noch ein freies Elektronenpaar.“</i>

3.1.3 Lösungswege beschreiben	Die Vp. beschreibt, benennt oder kommentiert die Methoden, den Lösungsweg als Ganzes oder die Vorgehensweise im Einzelnen, die sie bei der Bearbeitung eines Problems benutzt oder andenkt.	
3.1.3.1 Repräsentationsform ‚Text‘ wählen	Die Vp. beschreibt, benennt oder kommentiert die Methoden, den Lösungsweg mithilfe des in der Aufgabe angeführten Textes.	<i>„Also wir haben Eisen und das wird dann zu Eisen(III)+. Die drei Elektronen (6 Sek.) müssen der Chromsalzlösung da zugeführt werden, damit Chrom reduziert werden kann.“</i>
3.1.3.2 Repräsentationsform ‚Symbol‘ wählen	Die Vp. beschreibt, benennt oder kommentiert die Methoden, den Lösungsweg mithilfe des in der Aufgabe angeführten Symbols.	<i>„Machen wir weiter mit dem HCl. Also man hat gasförmiges Chlorwasserstoff, löst das in Wasser. Es entstehen (7 Sek.) Hydroxid-Ionen und Chlorid-Ionen und eben hier die Hydroxid-Ionen als Kennzeichen einer sauren Lösung. Und das HCl als Teilchen ist ein Protonendonator und damit ein Säureteilchen.“</i>
3.1.3.3 Repräsentationsform ‚Text-Symbol‘ wählen	Die Vp. beschreibt, benennt oder kommentiert die Methoden, den Lösungsweg mithilfe des in der Aufgabe angeführten Symbols und Textes (insbesondere Verbindungsnamen und Summenformel)	<i>„Ja. Ich habe einen Hochofen gezeichnet, ein schachtförmiges Bauwerk. Oben wird Eisenerz und Koks dazugegeben und unten Stahl, beziehungsweise nein, Eisen für Stahlproduktion entnommen. (43 Sek.) Und die Gase steigen von unten nach oben auf. Ich meine, das ist ja hier CO, das aufsteigt. Ja. Innerhalb der Skizze.“</i>
3.1.3.4 Repräsentationsform ‚Text‘ anwenden	Die Vp. nutzt für die Beschreibung, Benennung oder Kommentierung der Methode, des Lösungswegs einen Text.	<i>„Ja, würde ich halt ergänzen, bei der Reduktion von Nitrat-Teilchen oder Nitrat-Ionen und der damit einhergehenden Oxidation von Quecksilber entstehen Quecksilber-Ionen, ja, und Stickstoffmonoxid-Moleküle und Wassermoleküle.“</i>

- 3.1.3.5 Repräsentationsform ‚Symbol‘ anwenden Die Vp. nutzt für die Beschreibung, Benennung oder Kommentierung der Methode, des Lösungswegs ein Symbol. *„Kohlenstoffdioxid. Jetzt würde ich an die Sachen herangehen und versuchen die Redox-Gleichung aufzustellen. Hier würde ich die klassischen Schritte befolgen. Das heißt, ich notiere mir erstmal die Edukte und die Produkte mit einem Reaktionspfeil.“*
- 3.1.3.6 Repräsentationsform ‚Bild‘ anwenden Die Vp. nutzt für die Beschreibung, Benennung oder Kommentierung der Methode, des Lösungswegs ein Bild. *„Also ich versuche mich an einer Skizze. Und zeichnen einen langen Schacht. (7 Sek.) Oben entweicht dann das Gichtgas. (7 Sek.) Und unten wird dann eben Eisenerz und Koks zugegeben“*
- 3.1.3.7 Repräsentationsform ‚Symbol-Bild‘ anwenden Die Vp. nutzt für die Beschreibung, Benennung oder Kommentierung der Methode, des Lösungswegs ein Bild und ein Symbol. *„Das heißt, ich müsste ein bisschen mehr SO_4 Minus-Ionen rein zeichnen in meine Versuchsbeschreibung. Am besten wäre es natürlich in unterschiedlichen Farben, die habe ich jetzt gerade nicht, würde ich aber dann so machen.“*
- 3.1.3.8 Repräsentationsform ‚Text-Symbol‘ anwenden Die Vp. nutzt für die Beschreibung, Benennung oder Kommentierung der Methode, des Lösungswegs einen Text und ein Symbol. *„Dann, das Ammoniumhydroxid muss als Salz in Wasser gelöst werden, damit überhaupt erst eine Base (?oder) eine Lauge entsteht. Wenn man es genau nimmt, eine basische Lösung. (6 Sek.) Und das führt dann zu einer Hydratation und es entstehen Ammonium-Ionen und Hydroxid-Ionen in Lösung. Und die Hydroxid-Ionen sind Kennzeichen im Prinzip einer basischen Lösung“*
- 3.1.3.9 Repräsentationsform ‚Text-Bild‘ anwenden Die Vp. nutzt für die Beschreibung, Benennung oder Kommentierung der Methode, des Lösungswegs einen Text und ein Bild. *„Und dann muss eine Elektrode davon eine Eisen-Elektrode sein, das also den Schlüssel darstellt, der verchromt werden soll.“*

3.1.3.10 Repräsentationsform ,Text-Symbol-Bild' anwenden	Die Vp. nutzt für die Beschreibung, Benennung oder Kommentierung der Methode, des Lösungswegs einen Text, ein Symbol und ein Bild.	<i>„So, die Chrom-Ionen sollen an den einen Schlüssel dran. Das hätte ich irgendwie geschickter zeichnen können. Ich versuche es nochmal. So, der Schlüssel ist in der Lösung. So. Und die Chrom-Ionen sollen aus der Lösung an den Schlüssel drangehen und eben da mit den Elektronen zu Chromatomen reagieren. Und dabei werden die Eisentome zu Eisen-Ionen.“</i>
3.2.1 Schlussfolgerungen unter Verwendung der in den Aufgaben gegebenen In-formationen	Die Vp setzt im Text/Symbol gegebene Informationen in Beziehung durch das Ableiten logischer Schlüsse in Form von `Wenn das so ist, dann folgt daraus ...` oder in Form von Erklärungen eines Sachverhaltes. Diese logischen Inferenzen dienen alle dem Nachvollziehen des Textes/Symbols, das im Wesentlichen kleinschrittig erfolgt. Sollten die dabei in Beziehung gesetzten Informationen jedoch weiter zurückliegen, wird dies durch eine zusätzliche Codierung in die Kategorie 1.1.1, 1.1.2 oder 1.1.3 deutlich. Die Wahl der Repräsentationsform sowie der Einsatz reflektierter Fachsprache (Text/Symbol) sind hierfür entscheidend.	
3.2.1.1 Text	Die Vp. schlussfolgert aus dem Text der Aufgabe.	<i>„Ok, ich will die Chromionen als elementares Chrom auf dem Eisenschlüssel haben, das heißt, weil die dreifach positiv geladen sind, braucht man da irgendwie die Elektronen, damit die eben aufgenommen werden und die Chromionen zu Chromatomen werden und sich in einem Gitter um das Eisen drum herum legen.“</i>

3.2.1.2 Symbol	Die Vp. schlussfolgert aus den Symbolen der Aufgabe.	<i>„Und dadurch fließen die Elektronen schneller in die Elektronen rein beziehungsweise weg. Ich habe das Gefühl, dass die Ionen dadurch, sieht so aus, als würde sie schneller ablaufen. Die Teilchen bewegen sich zielstrebig in die entsprechende Richtung und es werden noch mehr Jod-Moleküle beziehungsweise Zink-Atome gebildet.“</i>
3.2.1.3 Text – Symbol	Die Vp. schlussfolgert aus dem Text und Symbol der Aufgabe	<i>„Also wenn Sauerstoff zugegeben wird, müsste mit dem Kohlenstoff aus Eisenerz, Koks und Zusatzstoffe, müsste doch dann eben zu 2CO_2 reagieren und zu 2CO werden.“</i>
3.2.2 Notationen	Die Vp. notiert im Vergleich zum Gesprochenen in einer anderen Repräsentationsform (Text oder Symbol; bspw. gesprochenem Text wie Verbindungsnamen etc. und notierten Symbolen wie Reaktionsgleichungen, Summenformeln usw.).	
3.2.3 Diagnose eigener Fehler beim Elaborieren nach 3.2.1 bis 3.2.2	Die Vp. hat während des vorangegangenen Lernens Schlussfolgerungen oder Ergebnisse entwickelt, deren Richtigkeit sie jetzt in Frage stellt. Dazu kann sie Vorwissen nutzen, welches ihr nun einfällt, oder Informationen, die sie gerade erst in der Aufgabe findet.	
3.2.3.1 Diagnose mittels Text	Die Vp. nutzt für die Diagnose der bisherigen Schlussfolgerungen den in der Aufgabe dargelegten Text.	<i>„Gut, dann mache ich mal die Repräsentationsformeln. Ach so, ich hätte-. Ups. Oxidation und Reduktion habe ich gar nicht erwähnt vorhin.“</i>
3.2.3.2 Diagnose mittels Symbol	Die Vp. nutzt für die Diagnose der bisherigen Schlussfolgerungen die in der Aufgabe dargestellten Symbole.	<i>„Jetzt ist mir gerade noch aufgefallen, dass ich bei der Oxidation die O zwei minus Ionen vergessen habe. Die habe ich jetzt noch hingeschrieben. Dann habe ich mir auch die Ladungen auf beiden Seiten angeschaut und dann ist mir aufgefallen, dass wir bei der Oxidation ja quasi vier negative Ladungen</i>

auf der Seite der Edukte und vier negative Ladungen auf der Seite der Produkte haben.“

3.2.3.3 Diagnose mittels Zusammenhang zwischen Text und Symbol

Die Vp. nutzt für die Diagnose der bisherigen Schlussfolgerungen den Zusammenhang der in der Aufgabe dargestellten Textpassagen und des Symbols (vor allem die Kombination aus Summenformel/Partikelform und Verbindungsnamen/Fachbegriff, auch Ko-effizienten usw.).

*„Und die Zn²⁺-Teilchen, also die Zinkionen, durch-
. Habe ich jetzt falsch gesagt davor“*

3.3 Inferenzen, die über Text und Symbol hinausgehen

3.3.1 Zweifel am Text/Symbol

„Da fehlen jetzt aus meiner Sicht die freien Elektronenpaare.“

3.3.2 Inhaltliche Bewertung des Textes/Symbols

Die Vp. kommentiert entweder wertend oder im Hinblick auf ihre Beschaffenheit das Wesen (Struktur, Gehalt, Wert, Aussagekraft) und/ oder den Inhalt einer Information.

„Ja, das Wort Beobachten schon in dem Satz ist ein bisschen komisch“

4.1 Schwerpunktsetzungen

Die Vp. misst einem bestimmten Sachverhalt (auch wenn dieser nicht in der Aufgabenstellung steht; eigene Gedanken sind ebenso bedeutsam) eine besondere Bedeutung bei und sagt dies auch explizit. Sie betont bestimmte Inhalte während der Elaboration.

Die Vp. unterstreicht einzelne Wörter, Sätze, Abschnitte, Bilder, Symbole oder Teile davon bzw. streicht an oder umkreist sie, notiert sie. Die Codierung erfolgt anhand der bearbeiteten Aufgabenblätter, nicht anhand der Transkripte.

- 4.1.1 Schwerpunktsetzung Text Die Vp. misst einer/m bestimmten Text(stelle) eine besondere Bedeutung bei und sagt dies auch explizit. Sie betont bestimmte Textpassagen während der Elaboration. „Muss ich mir jetzt mal unterstreichen. Also violette Farbe Rotkohl [...]“
- 4.1.2 Schwerpunktsetzung Symbol Die Vp. misst einem bestimmten Symbol eine besondere Bedeutung bei und sagt dies auch explizit. Sie betont bestimmte Symbole während der Elaboration. „Gut. Dann schauen wir uns mal Symbol an.“
- 4.1.3 Schwerpunktsetzung Text – Symbol Die Vp misst einem bestimmten Sachverhalt oder Text(stelle)/Symbol in Verknüpfung eine besondere Bedeutung bei und sagt dies auch explizit. Sie betont bestimmte Textpassagen/Symbole während des Lernprozesses. „Ja, das finde ich gut, weil erstens die Symbolschreibweise der Elemente, also 3HG und Hg2+ mitbenutzt werden, sodass man weiß, welcher Fachbegriff bezieht sich auf welches Symbol in der Symbolsprache“
- 4.2 Detailreduktion Die Vp. hält Informationen und Details innerhalb einer Sinneinheit für überflüssig. Die Vp. streicht einzelne Wörter, Sätze, Abschnitte, Symbole oder Teile davon durch. Die Codierung erfolgt anhand der bearbeiteten Aufgabenblätter der Vp. nicht anhand der Transkripte.
- 4.2.1 Detailreduktion Text Die Vp hält Textpassagen innerhalb einer Aufgabe für überflüssig. Die Vp streicht einzelne Wörter, Sätze, Abschnitte, Teile davon durch. „Man würde also den Begriff Reduktion hier erst mal rauslassen.“
- 4.2.2 Detailreduktion Symbol Die Vp. hält Symbole innerhalb einer Aufgabe für überflüssig. Die Vp. streicht einzelne Symbole oder Teile davon durch. „Bei der Reduktion von Nitrat entsteht das farb- und geruchlose Gas Stickstoffmonoxid. Und diese Molekülformel weglassen.“

4.3 Text- und/oder Symbolzusammenfassungen

Die Vp. fasst den genannten Text bzw. zumindest große Textabschnitte nachträglich, einzelne Absätze oder Symbole (Reaktionsgleichungen) zwischendurch zusammen. Dies dient vordergründig dem Memorieren wesentlicher Text- oder Symbolinformationen und in erster Linie der Strukturierung von Text- oder Symbolinformationen. Jedes einzeln hervorgehobene Wort/Symbol, jede Wort-/Symbolgruppe oder jeder nochmals benannte Text-/Symbolabschnitt wird einzeln codiert.

*„Also wir sehen hier die Reaktionsgleichungen.
NH₄OH + HCl.“*

A.3.3 Häufigkeitsanalysen der qualitativen Auswertung

A.3.3.1 Auswirkungen von AR auf das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis

Tabelle A22. Häufigkeitsanalyse der Hauptkategorien (KAT 1) aus der Tablet-Gruppe, bestehend aus Simulations- und AR-Gruppe (N = 40) mit Differenzierung zwischen Prä- und Posttest sowie der Zu- bzw. Abnahme des Elaborationsverhaltens.

Hauptkategorie von KAT 1	Prä-Test		Post-Test		total	Ab-/Zunahme
	H _n	h _n [%]	H _n	h _n [%]	H _n	h _{n Post} - h _{n Prä} [%]
1. Hinzufügen v. Wissens-elementen d. Abruf von Vorwissen	494	13.27	343	10.99	837	-2.28
2. Vergeblicher Abruf von Information aus dem Gedächtnis	17	0.46	43	1.38	60	0.92
3. Hinzufügen v. Wissen d. Wis-senserzeugung mittels Inferenzen	2629	70.62	2298	73.65	4927	3.04
4. Reduktion von Detailwissen	335	9.00	247	7.92	582	-1.08
5. Oberflächenelaboration	31	0.83	21	0.67	52	-0.16
6. Monitoring Statements	161	4.32	125	4.01	286	-0.32
7. Restkategorie	56	1.50	43	1.38	99	-0.13

Anmerkung. H_n = Absolute Häufigkeit; h_n = relative Häufigkeit; T = Teilchen; S = Stoff

Tabelle A23. Häufigkeitsanalyse der Hauptkategorien (KAT 1) im Gruppenvergleich, Simulations- vs. AR-Gruppe (N = 40) mit Differenzierung zwischen Prä- und Posttest sowie der Zu- bzw. Abnahme des Elaborationsverhaltens.

Hauptkategorien (KAT 1)		Prä-Test		Post-Test		Ab-/Zunahme
		H _n	h _n [%]	H _n	h _n [%]	h _{n Post} - h _{n Prä} [%]
1. Hinzufügen von Wissen d. Abruf zugeh. Wissens aus d. Gedächtnis	AR	260	14.18	178	10.89	-3.30
	Sim	234	12.38	165	11.11	-1.27
2. Vergeblicher Abruf von Wissen aus dem Gedächtnis	AR	12	0.65	19	1.16	0.51
	Sim	5	0.26	24	1.62	1.35
3. Hinzufügen von Wissen d. Wis-senserzeugung mittels Inferenzen	AR	1274	69.50	1222	74.74	5.24
	Sim	1355	71.69	1076	72.46	0.76
4. Reduktion von Detailwissen durch Streichung	AR	166	9.06	124	7.58	-1.47
	Sim	169	8.94	123	8.28	-0.66

Anmerkung. H_n = Absolute Häufigkeit; h_n = relative Häufigkeit; T = Teilchen; S = Stoff

Hauptkategorie 1: Hinzufügen von Wissens-elementen durch Abruf zugehörigen Wissens aus dem Gedächtnis

Tabelle A24. Häufigkeitsanalyse der Unter- und Subkategorien von 1 (KAT 1) aus der Tablet-Gruppe, bestehend aus Simulations- und AR-Gruppe (N = 40) mit Differenzierung zwischen Prä- und Posttest sowie der Zu- bzw. Abnahme des Elaborationsverhaltens.

Unter-/Subkategorie zu 1. (KAT 1)	Prä-Test		Post-Test		total	Ab-/Zunahme
	H _n	h _n [%]	H _n	h _n [%]	H _n	h _{n Post} - h _{n Prä} [%]
1.1 Nennung von Wissens-elementen (nicht in aktueller Aufgabe)	215	45.23	111	33.53	326	-11.70
1.1.3 Aus dem Vorwissen	212	98.60	101	90.99	313	-7.61
1.1.3.1 Inhalte auf T-Ebene	174	82.08	72	71.29	246	-10.79

1.1.3.2 Inhalte auf S-Ebene	38	17.92	29	28.71	67	10.79
1.2 Suche nach Beziehungen	279	56.48	232	67.64	511	11.16
1.2.1 auf T-Ebene	148	53.05	128	55.17	276	2.13
1.2.2 auf S-Ebene	40	14.34	46	19.83	86	5.49
1.2.3 mit dem Vorwissen	91	32.62	58	25.00	149	-7.62
1.2.3.1 S-Ebene	39	42.86	27	46.55	66	3.69
1.2.3.2 T-Ebene	52	57.14	31	53.45	83	-3.69

Anmerkung. H_n = Absolute Häufigkeit; h_n = relative Häufigkeit; T = Teilchen; S = Stoff

Tabelle A25. Häufigkeitsanalyse Unter- und Subkategorien zu 1. (KAT 1) im Gruppenvergleich, Simulations- vs. AR-Gruppe (N = 40) mit Differenzierung zwischen Prä- und Posttest sowie der Zu- bzw. Abnahme des Elaborationsverhaltens.

Unter-/Subkategorie zu 1. (KAT 1)	Prä-Test		Post-Test		Ab-/Zunahme	
	H_n	h_n [%]	H_n	h_n [%]	$h_{n \text{ Post}} - h_{n \text{ Prä}}$ [%]	
1.1 Nennung von Wissens-elementen (nicht in aktueller Aufgabe)	AR	109	41.92	61	34.27	-7.65
	Sim	106	45.30	50	30.30	-15.00
1.1.3 Aus dem Vorwissen	AR	106	97.25	55	90.16	-7.08
	Sim	106	100	46	92.00	-8.00
1.1.3.1 Inhalte auf T-Ebene	AR	84	79.25	37	67.27	-11.97
	Sim	90	84.91	35	76.09	-8.82
1.1.3.2 Inhalte auf S-Ebene	AR	22	20.75	18	32.73	11.97
	Sim	16	15.09	11	23.91	8.82
1.2 Suche nach Beziehungen	AR	151	58.08	117	65.73	7.65
	Sim	128	54.70	115	69.70	15.00
1.2.1 auf T-Ebene	AR	76	50.33	51	43.59	-6.74
	Sim	72	56.25	77	66.96	10.71
1.2.2 auf S-Ebene	AR	20	13.25	24	20.51	7.27
	Sim	20	15.63	22	19.13	3.51
1.2.3 mit dem Vorwissen	AR	55	36.42	42	35.90	-0.53
	Sim	36	28.13	16	13.91	-14.21
1.2.3.1 S-Ebene	AR	29	52.73	19	45.24	-7.49
	Sim	10	27.78	8	50.00	22.22
1.2.3.2 T-Ebene	AR	26	47.27	23	54.76	7.49
	Sim	26	72.22	8	50.00	-22.22

Anmerkung. H_n = Absolute Häufigkeit; h_n = relative Häufigkeit; T = Teilchen; S = Stoff

Hauptkategorie 3: Hinzufügen von Wissen durch Wissenserzeugung mittels (logischer) Inferenzen

Tabelle A26. Häufigkeitsanalyse der Subkategorien von 3.1 (KAT 1) aus der Tablet-Gruppe, bestehend aus Simulations- und AR-Gruppe (N = 40) mit Differenzierung zwischen Prä- und Posttest sowie der Zu- bzw. Abnahme des Elaborationsverhaltens.

Unter-/Subkategorie zu 3. (KAT 1)	Prä-Test		Post-Test		Total	Ab-/Zunahme
	H_n	h_n [%]	H_n	h_n [%]	H_n	$h_{n \text{ Post}} - h_{n \text{ Prä}}$ [%]
3.1 Inferenzen (Aufbau Text-/Symbol-/Bildbasis)	1861	70,79	1617	70,37	3478	-0,42
3.1.1 Paraphrasieren in S-/T-bene	240	12.90	180	11.13	420	-1.76
3.1.1.1 Von ER auf T-Ebene	163	67.92	93	51.67	256	-16.25
3.1.1.2 von ER auf S-Ebene	77	32.08	87	48.33	164	16.25
3.1.2 Bezieh. herstellen T- S-Ebene	122	6.56	175	10.82	297	4.27

3.1.3 Lösungswege beschreiben	1382	74.26	1159	71.68	2541	-2.59
3.1.3.1 T-Ebene wählen	378	27.35	342	29.51	720	2.16
3.1.3.2 S-Ebene wählen	102	7.38	105	9.06	207	1.68
3.1.3.3 T-Ebene anwenden	653	47.25	451	38.91	1104	-8.34
3.1.3.4 S-Ebene anwenden	149	10.78	160	13.81	309	3.02
3.1.3.5 S- und T-Ebene anwenden	100	7.24	101	8.71	201	1.48
3.1.4 Zweifel an S-/T-Ebene	27	1.45	31	1.92	58	0.47
3.1.5 Inhaltliche Bewertung	90	4.84	72	4.45	162	-0.38
3.1.5.1 T-Ebene	65	72.22	44	61.11	109	-11.11
3.1.5.2 S-Ebene	16	17.78	23	31.94	39	14.17
3.1.5.3 S-T-Ebenenwechsel	9	10.00	5	6.94	14	-3.06

Anmerkung. H_n = Absolute Häufigkeit; h_n = relative Häufigkeit; T = Teilchen; S = Stoff

Tabelle A27. Häufigkeitsanalyse der Subkategorien von 3.2 (KAT 1) aus der Tablet-Gruppe, bestehend aus Simulations- und AR-Gruppe (N = 40) mit Differenzierung zwischen Prä- und Posttest sowie der Zu- bzw. Abnahme des Elaborationsverhaltens.

Unter-/Subkategorie zu 3. (KAT 1)	Prä-Test		Post-Test		total	Ab-/Zunahme
	H_n	h_n [%]	H_n	h_n [%]	H_n	$h_{n\text{ Post}} - h_{n\text{ Prä}}$ [%]
3.2 Inferenzen (Aufbau Situationsmodell)	512	19.48	482	20.97	994	1.50
3.2.1 Schlussfolgerungen	126	24.61	137	28.42	263	3.81
3.2.1.1 Schlussfolgerung T-Ebene	101	80.16	93	67.88	194	-12.28
3.2.1.2 Schlussfolgerung S-Ebene	14	11.11	26	18.98	40	7.87
3.2.1.3 Schlussfolgerung S-/T-Ebene	11	8.73	18	13.14	29	4.41
3.2.2 Ergebnis nennen	294	57.42	254	52.70	548	-4.72
3.2.5 Diagnose eigener Fehler	56	10.94	64	13.28	120	2.34
3.2.5.1 Diagnose T-Ebene	25	44.64	26	40.63	51	-4.02
3.2.5.2 Diagnose S-Ebene	4	7.14	8	12.50	12	5.36
3.2.5.3 Diagnose S-/T-Ebene	1	1.79	3	4.69	4	2.90
3.2.5.4 Wahrnehmen v. Widerspruch	26	46.43	27	42.19	53	-4.24

Anmerkung. H_n = Absolute Häufigkeit; h_n = relative Häufigkeit; T = Teilchen; S = Stoff

Tabelle A28. Häufigkeitsanalyse der Subkategorien von 3.3 (KAT 1) aus der Tablet-Gruppe, bestehend aus Simulations- und AR-Gruppe (N = 40) mit Differenzierung zwischen Prä- und Posttest sowie der Zu- bzw. Abnahme des Elaborationsverhaltens.

Unter-/Subkategorie zu 3. (KAT 1)	Prä-Test		Post-Test		total	Ab-/Zunahme
	H_n	h_n [%]	H_n	h_n [%]	H_n	$h_{n\text{ Post}} - h_{n\text{ Prä}}$ [%]
3.3 Inferenzen (über S-/T-Ebene hinaus)	256	9.74	199	8.66	455	-1.08
3.3.1 Bemerkungen meth. Vorgehen	146	57.03	106	53.27	252	-3.76
3.3.2 Eigene weiterführ. Gedanken	23	8.98	24	12.06	47	3.08

Anmerkung. H_n = Absolute Häufigkeit; h_n = relative Häufigkeit; T = Teilchen; S = Stoff

Tabelle A29. Häufigkeitsanalyse Subkategorien zu 3.1 (KAT 1) im Gruppenvergleich, Simulations- vs. AR-Gruppe (N = 40) mit Differenzierung zwischen Prä- und Posttest sowie der Zu- bzw. Abnahme des Elaborationsverhaltens.

Unter-/Subkategorie zu 3. (KAT 1)		Prä-Test		Post-Test		Ab-/Zunahme
		H _n	h _n [%]	H _n	h _n [%]	h _{n Post} - h _{n Prä} [%]
3.1 Inferenzen (Aufbau Text-/ Symbol-/Bildbasis)	AR	890	69.86	862	70.54	0.68
	Sim	971	71.66	755	70.17	-1.49
3.1.1 Paraphrasieren in S-/T-Ebene	AR	116	13.03	99	11.48	-1.55
	Sim	124	12.77	81	10.73	-2.04
3.1.1.1 Von ER auf T-Ebene	AR	79	68.10	50	50.51	-17.60
	Sim	84	67.74	43	53.09	-14.66
3.1.1.2 von ER auf S-Ebene	AR	37	31.90	49	49.49	17.60
	Sim	40	32.26	38	46.91	14.66
3.1.2 Bezieh. herstellen T- S-Ebene	AR	55	6.18	101	11.72	5.54
	Sim	67	6.90	74	9.80	2.90
3.1.3 Lösungswege beschreiben	AR	652	73.26	601	69.72	-3.54
	Sim	730	75.18	558	73.91	-1.27
3.1.3.1 T-Ebene wählen	AR	168	25.77	176	29.28	3.52
	Sim	210	28.77	166	29.75	0.98
3.1.3.2 S-Ebene wählen	AR	50	7.67	51	8.49	0.82
	Sim	52	7.12	54	9.68	2.55
3.1.3.3 T-Ebene anwenden	AR	309	47.39	223	37.10	-10.29
	Sim	344	47.12	228	40.86	-6.26
3.1.3.4 S-Ebene anwenden	AR	77	11.81	93	15.47	3.66
	Sim	72	9.86	67	12.01	2.14
3.1.3.5 S- und T-Ebene anwenden	AR	48	7.36	58	9.65	2.29
	Sim	52	7.12	43	7.71	0.58
3.1.4 Zweifel an S-/T-Ebene	AR	11	1.24	21	2.44	1.20
	Sim	16	1.65	10	1.32	-0.32
3.1.5 Inhaltliche Bewertung	AR	56	6.29	40	4.64	-1.65
	Sim	34	3.50	32	4.24	0.74
3.1.5.1 T-Ebene	AR	43	76.79	24	60.00	-16.79
	Sim	22	64.71	20	62.50	-2.21
3.1.5.2 S-Ebene	AR	7	12.50	12	30.00	17.50
	Sim	9	26.47	11	34.38	7.90
3.1.5.3 S-T-Ebenenwechsel	AR	6	10.71	4	10.00	-0.71
	Sim	3	8.82	1	3.13	-5.70

Anmerkung. H_n = Absolute Häufigkeit; h_n = relative Häufigkeit; T = Teilchen; S = Stoff

Tabelle A30. Häufigkeitsanalyse Subkategorien zu 3.2 (KAT 1) im Gruppenvergleich, Simulations- vs. AR-Gruppe (N = 40) mit Differenzierung zwischen Prä- und Posttest sowie der Zu- bzw. Abnahme des Elaborationsverhaltens.

Unter-/Subkategorie zu 3. (KAT 1)		Prä-Test		Post-Test		Ab-/Zunahme
		H _n	h _n [%]	H _n	h _n [%]	h _{n Post} - h _{n Prä} [%]
3.2 Inferenzen (Aufbau Situationsmodell)	AR	252	19.78	252	20.62	0.84
	Sim	260	19.19	230	21.38	2.19
3.2.1 Schlussfolgerungen	AR	69	27.38	73	28.97	1.59
	Sim	57	21.92	64	27.83	5.90
3.2.1.1 Schlussfolgerung T-Ebene	AR	56	81.16	48	65.75	-15.41
	Sim	45	78.95	45	70.31	-8.63
3.2.1.2 Schlussfolgerung S-Ebene	AR	10	14.49	15	20.55	6.06
	Sim	4	7.02	11	17.19	10.17

3.2.1.3 Schlussfolgerung S/T-Ebene	AR	3	4.35	10	13.70	9.35
	Sim	8	14.04	8	12.50	-1.54
3.2.2 Ergebnis nennen	AR	136	53.97	124	49.21	-4.76
	Sim	158	60.77	130	56.52	-4.25
3.2.5 Diagnose eigener Fehler	AR	26	10.32	36	14.29	3.97
	Sim	30	11.54	28	12.17	0.64
3.2.5.1 Diagnose T-Ebene	AR	10	38.46	14	38.89	0.43
	Sim	15	50.00	12	42.86	-7.14
3.2.5.2 Diagnose S-Ebene	AR	1	3.85	5	13.89	10.04
	Sim	3	10.00	3	10.71	0.71
3.2.5.3 Diagnose S-/T-Ebene	AR	0	0.00	2	5.56	5.56
	Sim	1	3.33	1	3.57	0.24
3.2.5.4 Wahrnehmen v. Widerspruch	AR	15	57.69	15	41.67	-16.03
	Sim	11	36.67	12	42.86	6.19

Tabelle A31. Häufigkeitsanalyse Subkategorien zu 3.3 (Kat 1) im Gruppenvergleich, Simulations- vs. AR-Gruppe (N = 40) mit Differenzierung zwischen Prä- und Posttest sowie der Zu- bzw. Abnahme des Elaborationsverhaltens.

Unter-/Subkategorie zu 3. (KAT 1)		Prä-Test		Post-Test		Ab-/Zunahme
		H _n	h _n [%]	H _n	h _n [%]	h _{n Post} - h _{n Prä} [%]
3.3 Inferenzen (über S-/T-Ebene hinaus)	AR	132	10.36	108	8.84	-1.52
	Sim	124	9.15	91	8.46	-0.69
3.3.1 Bemerkungen meth. Vorgehen	AR	83	62.88	58	53.70	-9.18
	Sim	63	50.81	48	52.75	1.94
3.3.2 Eigene weiterführ. Gedanken	AR	16	12.12	17	15.74	3.62
	Sim	7	5.56	7	7.69	2.05
3.3.3 Äußerungen der Unsicherheit	AR	33	25.00	33	30.56	5.56
	Sim	54	43.55	36	39.56	-3.99

Anmerkung. H_n = Absolute Häufigkeit; h_n = relative Häufigkeit; T = Teilchen; S = Stoff

Hauptkategorie 4: Reduktion von Detailwissen durch Streichung

Tabelle A32. Häufigkeitsanalyse der Unter- und Subkategorien von 4. (KAT 1) aus der Tablet-Gruppe, bestehend aus Simulations- und AR-Gruppe (N = 40) mit Differenzierung zwischen Prä- und Posttest sowie der Zu- bzw. Abnahme des Elaborationsverhaltens.

Unter-/Subkategorie zu 4. (KAT 1)	Prä-Test		Post-Test		total	Ab-/Zunahme
	H _n	h _n [%]	H _n	h _n [%]	H _n	h _{n Post} - h _{n Prä} [%]
4.1 Zieldefinitionen	64	19.10	57	23.08	121	3.97
4.2 Schwerpunktsetzungen	150	44.78	114	46.15	264	1.38
4.2.1 Schwerpunkt T-Ebene	67	44.67	41	35.96	108	-8.70
4.2.2 Schwerpunkt S-Ebene	27	18.00	27	23.68	54	5.68
4.2.3 Schwerpunkt Ebenenwechsel	56	37.33	46	40.35	102	3.02
4.3 Detailreduktion	51	15.22	27	10.93	78	-4.29
4.3.1 Detailreduktion T-Ebene	24	47.06	11	40.74	35	-6.32
4.3.2 Detailreduktion S-Ebene	27	52.94	16	59.26	43	6.32

Anmerkung. H_n = Absolute Häufigkeit; h_n = relative Häufigkeit; T = Teilchen; S = Stoff

Tabelle A33. Häufigkeitsanalyse Unter- und Subkategorien zu 4. (KAT 1) im Gruppenvergleich, Simulations- vs. AR-Gruppe. (N = 40) mit Differenzierung zwischen Prä- und Posttest sowie der Zu- bzw. Abnahme des Elaborationsverhaltens.

Unter-/Subkategorie zu 4. (KAT 1)		Prä-Test		Post-Test		Ab-/Zunahme
		H _n	h _n [%]	H _n	h _n [%]	h _n Post - h _n Prä [%]
4.1 Zieldefinitionen	AR	30	18.07	25	20.16	2.09
	Sim	34	20.12	32	26.02	5.90
4.2 Schwerpunktsetzungen	AR	77	46.39	58	46.77	0.39
	Sim	73	43.20	56	45.53	2.33
4.2.1 Schwerpunkt T-Ebene	AR	32	41.56	16	27.59	-13.97
	Sim	35	47.95	25	44.64	-3.30
4.2.2 Schwerpunkt S-Ebene	AR	14	18.18	14	24.14	5.96
	Sim	13	17.81	13	23.21	5.41
4.2.3 Schwerpunkt Ebenenwechsel	AR	31	40.26	28	48.28	8.02
	Sim	25	34.25	18	32.1	-2.10
4.3 Detailreduktion	AR	21	12.65	11	8.87	-3.78
	Sim	30	17.75	16	13.01	-4.74
4.3.1 Detailreduktion T-Ebene	AR	13	61.90	5	45.45	-16.45
	Sim	11	36.67	6	37.50	0.83
4.3.2 Detailreduktion S-Ebene	AR	8	38.10	6	54.55	16.45
	Sim	19	63.33	10	62.50	-0.83

Anmerkung. H_n = Absolute Häufigkeit; h_n = relative Häufigkeit; T = Teilchen; S = Stoff

A.3.3.2 Auswirkungen von AR auf die chemische Fachsprache

Tabelle A34. Häufigkeitsanalyse Hauptkategorien (KAT 2) im Gruppenvergleich, Simulations- vs. AR-Gruppe (N = 40) mit Differenzierung zwischen Prä- und Posttest sowie der Zu- bzw. Abnahme des Elaborationsverhaltens.

Hauptkategorien (KAT 2)		Prä-Test		Post-Test		Ab-/Zunahme
		H _n	h _n [%]	H _n	h _n [%]	h _n Post - h _n Prä [%]
1. Hinzufügen von Wissen d. Abruf zugeh. Wissens aus d. Gedächtnis	AR	166	15.01	111	10.94	-4.07
	Sim	178	18.35	130	13.54	-4.81
3. Hinzufügen von Wissen d. Wissenserzeugung mittels Inferenzen	AR	830	75.05	813	80.10	5.05
	Sim	707	72.89	744	77.50	4.61
4. Reduktion von Detailwissen durch Streichung	AR	110	9.95	91	8.97	-0.98
	Sim	85	8.76	86	8.96	0.20

Anmerkung. H_n = Absolute Häufigkeit; h_n = relative Häufigkeit; T = Teilchen; S = Stoff

Hauptkategorie 1: Hinzufügen von Wissensselementen durch Abruf zugehörigen Wissens aus dem Gedächtnis

Tabelle A35. Häufigkeitsanalyse Unter- und Subkategorien zu 1. (KAT 2) im Gruppenvergleich, Simulations- vs. AR-Gruppe (N = 40) mit Differenzierung zwischen Prä- und Posttest sowie der Zu- bzw. Abnahme des Elaborationsverhaltens

Unter-/Subkategorie zu 1. (KAT 2)		Prä-Test		Post-Test		Ab-/Zunahme
		H _n	h _n [%]	H _n	h _n [%]	h _{n Post} - h _{n Prä} [%]
1.1 Nennung von Wissensselementen (nicht in aktueller Aufgabe)	AR	66	39.76	36	32.43	-7.33
	Sim	45	25.28	42	32.31	7.03
1.1.1 aus dem Text	AR	4	6.06	0	0.00	-6.06
	Sim	3	6.67	4	9.52	2.86
1.1.3 aus der Lernumgebung	AR	0	0.00	3	8.33	8.33
	Sim	0	0.00	9	21.43	21.43
1.1.4 aus dem Vorwissen	AR	62	93.94	33	91.67	-2.27
	Sim	42	93.33	29	69.05	-24.29
1.2 Suche nach Beziehungen	AR	97	58.43	63	56.76	-1.68
	Sim	105	58.99	72	55.38	-3.60
1.2.1 mit dem Text	AR	38	39.18	19	30.16	-9.02
	Sim	58	55.24	16	22.22	-33.02
1.2.2 mit dem Symbol	AR	24	24.74	21	33.33	8.59
	Sim	31	29.52	37	51.39	21.87
1.2.4 mit dem Vorwissen	AR	35	36.08	23	36.51	0.43
	Sim	16	15.24	19	26.39	11.15
1.3.3 Nachschlagen und nochmals lesen im Text zur behandelten Aufg.	AR	3	1.81	12	10.81	9.00
	Sim	28	15.73	16	12.31	-3.42

Anmerkung. H_n = Absolute Häufigkeit; h_n = relative Häufigkeit; T = Teilchen; S = Stoff

Hauptkategorie 3: Hinzufügen von Wissen durch Wissensserzeugung mittels (logischer) Inferenzen

Tabelle A36. Häufigkeitsanalyse Subkategorien zu 3.1 (KAT 2) im Gruppenvergleich, Simulations- vs. AR-Gruppe (N = 40) mit Differenzierung zwischen Prä- und Posttest sowie der Zu- bzw. Abnahme des Elaborationsverhaltens.

Unter-/Subkategorie zu 3. (KAT 2)		Prä-Test		Post-Test		Ab-/Zunahme
		H _n	h _n [%]	H _n	h _n [%]	h _{n Post} - h _{n Prä} [%]
3.1 Inferenzen (Aufbau Text-/ Symbol-/Bildbasis)	AR	708	85.30	704	86.59	1.29
	Sim	586	82.89	637	85.62	2.73
3.1.1 Paraphrasieren zwischen ER	AR	90	12.71	65	9.23	-3.48
	Sim	95	16.21	54	8.48	-7.73
3.1.1.1 Paraphrasieren aus Text in Text	AR	19	21.11	20	30.77	9.66
	Sim	17	17.89	15	27.78	9.88
3.1.1.2 Paraphrasieren aus Text in Symbol	AR	17	18.89	9	13.85	-5.04
	Sim	19	20.00	10	18.52	-1.48
3.1.1.3 Paraphrasieren aus Text in Bild	AR	0	0.00	0	0.00	0.00
	Sim	2	2.11		0.00	-2.11
3.1.1.4 Paraphrasieren aus Symbol in Text	AR	54	60.00	36	55.38	-4.62
	Sim	57	60.00	29	53.70	-6.30
3.1.1.5 Paraphrasieren aus Symbol in Bild	AR	0	0.00	0	0.00	0.00
	Sim	0	0.00	0	0.00	0.00

3.1.2 Herstellen von Beziehungen zwischen Text und Symbol	AR	38	5.37	64	9.09	3.72
	Sim	51	8.70	40	6.28	-2.42
3.1.3 Lösungswege beschreiben	AR	580	81.92	575	81.68	-0.24
	Sim	440	75.09	543	85.24	10.16
3.1.3.1 Text wählen	AR	160	27.59	135	23.48	-4.11
	Sim	126	28.64	131	24.13	-4.51
3.1.3.2 Symbol wählen	AR	64	11.03	68	11.83	0.79
	Sim	52	11.82	82	15.10	3.28
3.1.3.3 Text-Symbol wählen	AR	56	9.66	85	14.78	5.13
	Sim	24	5.54	53	9.76	4.31
3.1.3.4 Text anwenden	AR	172	29.66	160	27.83	-1.83
	Sim	128	29.09	128	23.57	-5.52
3.1.3.5 Symbol anwenden	AR	8	1.38	10	1.74	0.36
	Sim	19	4.32	8	1.47	-2.84
3.1.3.6 Bild anwenden	AR	0	0.00	1	0.17	0.17
	Sim	5	1.14	2	0.37	-0.77
3.1.3.7 Symbol-Bild anwenden	AR	1	0.17	3	0.52	0.35
	Sim	0	0.00	2	0.37	0.37
3.1.3.8 Text-Symbol anwenden	AR	76	13.10	67	11.65	-1.45
	Sim	57	12.95	90	16.57	3.62
3.1.3.9 Text-Bild anwenden	AR	18	3.10	12	2.09	-1.02
	Sim	16	3.64	27	4.97	1.34
3.1.3.10 Text-Symbol-Bild anwenden	AR	25	4.31	34	5.91	1.60
	Sim	13	2.95	20	3.68	0.73
3.3 Inferenzen, die über Text-Symbol-Differenzierung hinaus gehen	AR	43	5.18	46	5.66	0.48
	Sim	32	4.53	32	4.30	-0.23
3.3.1 Zweifel an den (M)ER	AR	3	6.98	3	6.52	-0.46
	Sim	3	9.38	6	18.75	9.37
3.3.2 Inhaltliche Bewertung der (M)ER	AR	40	93.02	43	93.48	0.46
	Sim	29	90.63	26	81.25	-9.38

Anmerkung. H_n = Absolute Häufigkeit; h_n = relative Häufigkeit; T = Teilchen; S = Stoff

Tabelle A37. Häufigkeitsanalyse Subkategorien zu 3.2 (KAT 2) im Gruppenvergleich, Simulations- vs. AR-Gruppe (N = 40) mit Differenzierung zwischen Prä- und Posttest sowie der Zu- bzw. Abnahme des Elaborationsverhaltens.

Unter-/Subkategorie zu 3. (KAT 2)		Prä-Test		Post-Test		Ab-/Zunahme
		H_n	h_n [%]	H_n	h_n [%]	$h_{n\text{ Post}} - h_{n\text{ Prä}}$ [%]
3.2 Inferenzen (Aufbau Situationsmodell)	AR	79	9.52	63	7.75	-1.77
	Sim	89	12.59	75	10.08	-2.51
3.2.1 Schlussfolgerung unter Verwendung der gegebenen (M)ER	AR	72	91.14	50	79.37	-11.77
	Sim	75	84.27	60	80.00	-4.27
3.2.1.1 Schlussfolgerung mit Text	AR	38	52.78	17	34.00	-18.78
	Sim	38	50.67	26	43.33	-7.33
3.2.1.2 Schlussfolgerung mit Symbol	AR	31	43.06	24	48.00	4.94
	Sim	33	44.00	29	48.33	4.33
3.2.1.3 Schlussfolgerung mit Text-Symbol	AR	3	4.17	9	18.00	13.83
	Sim	4	5.33	5	8.33	3.00
3.2.3 Diagnose eigener Fehler	AR	7	8.86	13	20.63	11.77
	Sim	14	15.73	15	20.00	4.27
3.2.3.1 Diagnose mit Text	AR	4	57.14	6	46.15	-10.99
	Sim	6	42.86	7	46.67	3.81

3.2.3.2 Diagnose mit Symbol	AR	3	42.86	6	46.15	3.30
	Sim	8	57.14	6	40.00	-17.14
3.2.3.3 Diagnose mit Text-Symbol	AR	0	0.00	1	7.69	7.69
	Sim	0	0.00	2	13.33	13.33

Anmerkung. H_n = Absolute Häufigkeit; h_n = relative Häufigkeit; T = Teilchen; S = Stoff

Hauptkategorie 4: Reduktion von Detailwissen durch Streichung

Tabelle A38. Häufigkeitsanalyse Unter- und Subkategorien zu 4. (KAT 2) im Gruppenvergleich, Simulations- vs. AR-Gruppe (N = 40) mit Differenzierung zwischen Prä- und Posttest sowie der Zu- bzw. Abnahme des Elaborationsverhaltens.

Subkategorie zu 4. (KAT 2)		Prä-Test		Post-Test		Ab-/Zunahme
		H_n	h_n [%]	H_n	h_n [%]	$h_{n \text{ Post}} - h_{n \text{ Prä}}$ [%]
4.1 Schwerpunktsetzung	AR	71	64.55	74	81.32	16.77
	Sim	44	51.76	72	83.72	31.86
4.1.1 Text	AR	61	85.92	52	70.27	-15.65
	Sim	36	81.82	57	79.17	-2.65
4.1.2 Symbol	AR	7	9.86	16	21.62	11.76
	Sim	7	15.91	15	20.83	4.92
4.1.3 Text-Symbol	AR	3	4.23	6	8.11	3.88
	Sim	1	2.27	0	0.00	-2.27
4.2 Detailreduktion	AR	21	19.09	4	4.40	-14.70
	Sim	23	27.06	8	9.30	-17.76
4.2.1 Text	AR	18	85.71	4	100.00	14.29
	Sim	18	78.26	6	75.00	-3.26
4.2.2 Symbol	AR	3	14.29	0	0.00	-14.29
	Sim	5	21.74	2	25.00	3.26
4.3 Text-Symbol-Zusammenfassung	AR	18	16.36	13	14.29	-2.08
	Sim	18	21.18	6	6.98	-14.20

Anmerkung. H_n = Absolute Häufigkeit; h_n = relative Häufigkeit; T = Teilchen; S = Stoff

A.3.3.3 Auswirkungen der Interaktivität von AR auf das Stoff-Teilchen-Konzeptverständnis

Tabelle A39. Häufigkeitsanalyse Hauptkategorien (KAT 1) im Gruppenvergleich, HMD-AR- vs. AR-Gruppe (N = 40) mit Differenzierung zwischen Prä- und Posttest sowie der Zu- bzw. Abnahme des Elaborationsverhaltens.

Hauptkategorien (KAT 1)		Prä-Test		Post-Test		Ab-/Zunahme
		H_n	h_n [%]	H_n	h_n [%]	$h_{n \text{ Post}} - h_{n \text{ Prä}}$ [%]
1. Hinzufügen von Wissen d. Abruf zugeh. Wissens aus d. Gedächtnis	AR	260	14.18	178	10.89	-3.30
	HMD	229	11.13	173	10.25	-0.88
2. Vergeblicher Abruf von Wissen aus dem Gedächtnis	AR	12	0.65	19	1.16	0.51
	HMD	4	0.19	15	0.89	0.69
3. Hinzufügen von Wissen d. Wis-senserzeugung mittels Inferenzen	AR	1274	69.50	1222	74.74	5.24
	HMD	1542	74.96	1287	76.24	1.28
4. Reduktion von Detailwissen durch Streichung	AR	166	9.06	124	7.58	-1.47
	HMD	153	7.44	125	7.41	-0.03

Anmerkung. H_n = Absolute Häufigkeit; h_n = relative Häufigkeit; T = Teilchen; S = Stoff

Hauptkategorie 1: Hinzufügen von Wissens-elementen durch Abruf zugehörigen Wissens aus dem Gedächtnis

Tabelle A40. Häufigkeitsanalyse Subkategorien von 1. (KAT 1) im Gruppenvergleich, HMD-AR- vs. AR-Gruppe (N = 40) mit Differenzierung zwischen Prä- und Posttest sowie der Zu- bzw. Abnahme des Elaborationsverhaltens.

Unter-/Subkategorie zu 1.1 Nennung von Wissens-elementen (nicht in aktueller Aufgabe) und 1.2 Suche nach Beziehungen (KAT 1)		Prä-Test		Post-Test		Ab-/Zunahme
		H _n	h _n [%]	H _n	h _n [%]	h _{n Post} - h _{n Prä} [%]
1.1.3.1 aus Vorwissen auf T-Ebene	AR	84	79.25	37	67.27	-11.97
	HMD	88	79.28	35	76.09	-3.19
1.1.3.2 aus Vorwissen auf S-Ebene	AR	22	20.75	18	32.73	11.97
	HMD	23	20.72	11	23.91	3.19
1.2.1 auf T-Ebene	AR	76	50.33	51	43.59	-6.74
	HMD	47	40.17	62	55.86	15.68
1.2.2 auf S-Ebene	AR	20	13.25	24	20.51	7.27
	HMD	22	18.80	23	20.72	1.92
1.2.3 mit dem Vorwissen	AR	55	36.42	42	35.90	-0.53
	HMD	48	41.03	26	23.42	-17.60
1.2.3.1 S-Ebene	AR	29	52.73	19	45.24	-7.49
	HMD	18	37.50	9	34.62	-2.88
1.2.3.2 T-Ebene	AR	26	47.27	23	54.76	7.49
	HMD	30	62.50	17	65.38	2.88

Anmerkung. H_n = Absolute Häufigkeit; h_n = relative Häufigkeit; T = Teilchen; S = Stoff

Hauptkategorie 3: Hinzufügen von Wissen durch Wissenserzeugung mittels (logischer) Inferenzen

Tabelle A41. Häufigkeitsanalyse Subkategorien zu 3.1 (KAT 1) im Gruppenvergleich, HMD-AR- vs. AR-Gruppe (N = 40) mit Differenzierung zwischen Prä- und Posttest sowie der Zu- bzw. Abnahme des Elaborationsverhaltens.

Unter-/Subkategorie zu 3.1 Inferenzen (Aufbau Text-/ Symbol-/Bildbasis) (KAT 1)		Prä-Test		Post-Test		Ab-/Zunahme
		H _n	h _n [%]	H _n	h _n [%]	h _{n Post} - h _{n Prä} [%]
3.1.1.1 Paraphrasieren auf T-Ebene	AR	79	68.10	50	50.51	-17.60
	HMD	73	56.59	49	56.32	-0.27
3.1.1.2 Paraphrasieren auf S-Ebene	AR	37	31.90	49	49.49	17.60
	HMD	56	43.41	38	43.68	0.27
3.1.2 Bezieh. herstellen T- S-Ebene	AR	55	6.18	101	11.72	5.54
	HMD	101	8.70	112	11.83	3.13
3.1.3.1 Lösungswege beschreiben: T-Ebene wählen	AR	168	25.77	176	29.28	3.52
	HMD	253	30.08	249	35.78	5.69
3.1.3.2 Lösungswege beschreiben: S-Ebene wählen	AR	50	7.67	51	8.49	0.82
	HMD	92	10.94	69	9.91	-1.03
3.1.3.3 Lösungswege beschreiben: T-Ebene anwenden	AR	309	47.39	223	37.10	-10.29
	HMD	337	40.07	263	37.79	-2.28
3.1.3.4 Lösungswege beschreiben: S-Ebene anwenden	AR	77	11.81	93	15.47	3.66
	HMD	113	13.44	79	11.35	-2.09
3.1.3.5 Lösungswege beschreiben: S- und T-Ebene anwenden	AR	48	7.36	58	9.65	2.29
	HMD	46	5.47	36	5.17	-0.30

3.1.5.1 Inhaltl. Bewertung T-Ebene	AR	43	76.79	24	60.00	-16.79
	HMD	45	71.43	25	67.57	-3.86
3.1.5.2 Inhaltl. Bewertung S-Ebene	AR	7	12.50	12	30.00	17.50
	HMD	16	25.40	9	24.32	-1.07
3.1.5.3 Inhaltl. Bewertung S-T-Wechsel	AR	6	10.71	4	10.00	-0.71
	HMD	2	3.17	3	8.11	4.93

Anmerkung. H_n = Absolute Häufigkeit; h_n = relative Häufigkeit; T = Teilchen; S = Stoff

Tabelle A42. Häufigkeitsanalyse Subkategorien zu 3.2 (KAT 1) im Gruppenvergleich, HMD-AR- vs. AR-Gruppe (N = 40) mit Differenzierung zwischen Prä- und Posttest sowie der Zu- bzw. Abnahme des Elaborationsverhaltens.

Unter-/Subkategorie zu 3.2 Inferenzen (Aufbau Situationsmodell) (KAT 1)		Prä-Test		Post-Test		Ab-/Zunahme
		H_n	h_n [%]	H_n	h_n [%]	$h_{n \text{ Post}} - h_{n \text{ Prä}}$ [%]
3.2.1.1 Schlussfolgerung T-Ebene	AR	56	81.16	48	65.75	-15.41
	HMD	57	85.07	56	62.22	-22.85
3.2.1.2 Schlussfolgerung S-Ebene	AR	10	14.49	15	20.55	6.06
	HMD	10	14.93	32	35.56	20.63
3.2.1.3 Schlussfolgerung S/T-Ebene	AR	3	4.35	10	13.70	9.35
	HMD	0	0.00	2	2.22	2.22
3.2.5.1 Diagnose T-Ebene	AR	10	38.46	14	38.89	0.43
	HMD	22	53.66	10	35.71	-17.94
3.2.5.2 Diagnose S-Ebene	AR	1	3.85	5	13.89	10.04
	HMD	2	4.88	2	7.14	2.26
3.2.5.3 Diagnose S-/T-Ebene	AR	0	0.00	2	5.56	5.56
	HMD	1	2.44	1	3.57	1.13
3.2.5.4 Wahrnehmen Widerspruch	AR	15	57.69	15	41.67	-16.03
	HMD	16	39.02	15	53.13	14.55

Anmerkung. H_n = Absolute Häufigkeit; h_n = relative Häufigkeit; T = Teilchen; S = Stoff

Hauptkategorie 4: Reduktion von Detailwissen durch Streichung

Tabelle A43. Häufigkeitsanalyse Subkategorien von 4. (Kat 1) im Gruppenvergleich, HMD-AR- vs. AR-Gruppe (N = 40) mit Differenzierung zwischen Prä- und Posttest sowie der Zu- bzw. Abnahme des Elaborationsverhaltens.

Subkategorie zu 4. Detailreduktion durch Streichung (KAT 1)		Prä-Test		Post-Test		Ab-/Zunahme
		H_n	h_n [%]	H_n	h_n [%]	$h_{n \text{ Post}} - h_{n \text{ Prä}}$ [%]
4.2.1 Schwerpunkt T-Ebene	AR	32	41.56	16	27.59	-13.97
	HMD	30	50.85	19	33.93	-16.92
4.2.2 Schwerpunkt S-Ebene	AR	14	18.18	14	24.14	5.96
	HMD	11	18.64	16	28.57	9.93
4.2.3 Schwerpunkt Ebenenwechsel	AR	31	40.26	28	48.28	8.02
	HMD	18	30.51	21	37.50	6.99
4.3.1 Detailreduktion T-Ebene	AR	13	61.90	5	45.45	-16.45
	HMD	15	60.00	12	60.00	0.00
4.3.2 Detailreduktion S-Ebene	AR	8	38.10	6	54.55	16.45
	HMD	10	40.00	8	40.00	0.00

Anmerkung. H_n = Absolute Häufigkeit; h_n = relative Häufigkeit; T = Teilchen; S = Stoff

A.3.3.4 Auswirkungen der Interaktivität auf die chemische Fachsprache

Tabelle A44. Häufigkeitsanalyse Hauptkategorien (KAT 2) im Gruppenvergleich, HMD-AR- vs. AR-Gruppe (N = 40) mit Differenzierung zwischen Prä- und Posttest sowie der Zu- bzw. Abnahme des Elaborationsverhaltens.

Hauptkategorien (KAT 2)		Prä-Test		Post-Test		Ab-/Zunahme
		H _n	h _n [%]	H _n	h _n [%]	h _{n Post} - h _{n Prä} [%]
1. Hinzufügen von Wissen d. Abruf zugeh. Wissens aus d. Gedächtnis	AR	166	15.01	111	10.94	-4.07
	HMD	156	15.07	133	13.05	-2.02
3. Hinzufügen von Wissen d. Wis-senserzeugung mittels Inferenzen	AR	830	75.05	813	80.10	5.05
	HMD	753	72.75	792	77.72	4.97
4. Reduktion von Detailwissen durch Streichung	AR	110	9.95	91	8.97	-0.98
	HMD	126	12.17	94	9.22	-2.95

Anmerkung. H_n = Absolute Häufigkeit; h_n = relative Häufigkeit; T = Teilchen; S = Stoff

Hauptkategorie 1: Hinzufügen von Wissens-elementen durch Abruf zugehörigen Wissens aus dem Gedächtnis

Tabelle A45. Häufigkeitsanalyse Unter und Subkategorien zu 1. (KAT 2) im Gruppenvergleich, HMD-AR- vs. AR-Gruppe (N = 40) mit Differenzierung zwischen Prä- und Posttest sowie der Zu- bzw. Abnahme des Elaborationsverhaltens.

Unter-/Subkategorie zu 1. (KAT 2)		Prä-Test		Post-Test		Ab-/Zunahme
		H _n	h _n [%]	H _n	h _n [%]	h _{n Post} - h _{n Prä} [%]
1.1 Nennung von Wissens-elementen (nicht in aktueller Aufgabe)	AR	66	39.76	36	32.43	-7.33
	HMD	50	32.05	45	33.83	1.78
1.1.1 aus dem Text	AR	4	6.06	0	0.00	-6.06
	HMD	6	12.00	0	0.00	-12.00
1.1.3 aus der Lernumgebung	AR	0	0.00	3	8.33	8.33
	HMD	0	0.00	11	24.44	24.44
1.1.4 aus dem Vorwissen	AR	62	93.94	33	91.67	-2.27
	HMD	44	88.00	34	75.56	-12.44
1.2 Suche nach Beziehungen	AR	97	58.43	63	56.76	-1.68
	HMD	82	52.56	65	48.87	-3.69
1.2.1 mit dem Text	AR	38	39.18	19	30.16	-9.02
	HMD	39	47.56	14	21.54	-26.02
1.2.2 mit dem Symbol	AR	24	24.74	21	33.33	8.59
	HMD	24	29.27	38	58.46	29.19
1.2.4 mit dem Vorwissen	AR	35	36.08	23	36.51	0.43
	HMD	19	23.17	13	20.00	-3.17
1.3.3 Nachschlagen und nochmals lesen im Text zur behandelten Aufg.	AR	3	1.81	12	10.81	9.00
	HMD	24	15.38	23	17.29	1.91

Anmerkung. H_n = Absolute Häufigkeit; h_n = relative Häufigkeit; T = Teilchen; S = Stoff

Hauptkategorie 3: Hinzufügen von Wissen durch Wissenserzeugung mittels (logischer) Inferenzen

Tabelle A46. Häufigkeitsanalyse Unter- und Subkategorien zu 3.1 (Kat 2) im Gruppenvergleich, HMD-AR- vs. AR-Gruppe (N = 40) mit Differenzierung zwischen Prä- und Posttest sowie der Zu- bzw. Abnahme des Elaborationsverhaltens.

Unter-/Subkategorie zu 3. (KAT 2)		Prä-Test		Post-Test		Ab-/Zunahme
		H _n	h _n [%]	H _n	h _n [%]	h _n Post - h _n Prä [%]
3.1 Inferenzen (Aufbau Text-/ Symbol-/Bildbasis)	AR	708	85.30	704	86.59	1.29
	HMD	641	85.13	675	85.23	0.10
3.1.1 Paraphrasieren zwischen ER	AR	90	12.71	65	9.23	-3.48
	HMD	96	14.98	67	9.93	-5.05
3.1.1.1 Paraphrasieren aus Text in Text	AR	19	21.11	20	30.77	9.66
	HMD	11	11.46	14	20.90	9.44
3.1.1.2 Paraphrasieren aus Text in Symbol	AR	17	18.89	9	13.85	-5.04
	HMD	24	25.00	9	13.43	-11.57
3.1.1.3 Paraphrasieren aus Text in Bild	AR	0	0.00	0	0.00	0.00
	HMD	0	0.99	1	1.49	1.49
3.1.1.4 Paraphrasieren aus Symbol in Text	AR	54	60.00	36	55.38	-4.62
	HMD	61	63.54	43	64.18	0.64
3.1.1.5 Paraphrasieren aus Symbol in Bild	AR	0	0.00	0	0.00	0.00
	HMD	0	0.00	0	0.00	0.00
3.1.2 Herstellen von Beziehungen zwischen Text und Symbol	AR	38	5.37	64	9.09	3.72
	HMD	39	6.08	54	8.00	1.92
3.1.3 Lösungswege beschreiben	AR	580	81.92	575	81.68	-0.24
	HMD	506	78.94	554	82.07	3.13
3.1.3.1 Text wählen	AR	160	27.59	135	23.48	-4.11
	HMD	130	25.69	116	20.94	-4.75
3.1.3.2 Symbol wählen	AR	64	11.03	68	11.83	0.79
	HMD	53	10.47	68	12.27	1.80
3.1.3.3 Text-Symbol wählen	AR	56	9.66	85	14.78	5.13
	HMD	42	8.30	83	14.98	6.68
3.1.3.4 Text anwenden	AR	172	29.66	160	27.83	-1.83
	HMD	160	31.62	151	27.26	-4.36
3.1.3.5 Symbol anwenden	AR	8	1.38	10	1.74	0.36
	HMD	17	3.36	11	1.99	-1.37
3.1.3.6 Bild anwenden	AR	0	0.00	1	0.17	0.17
	HMD	1	0.20	1	0.18	-0.02
3.1.3.7 Symbol-Bild anwenden	AR	1	0.17	3	0.52	0.35
	HMD	1	0.20	2	0.36	0.16
3.1.3.8 Text-Symbol anwenden	AR	76	13.10	67	11.65	-1.45
	HMD	61	12.06	82	14.80	2.75
3.1.3.9 Text-Bild anwenden	AR	18	3.10	12	2.09	-1.02
	HMD	22	4.35	25	4.51	0.16
3.1.3.10 Text-Symbol-Bild anwenden	AR	25	4.31	34	5.91	1.60
	HMD	19	3.75	15	2.71	-1.05
3.3 Inferenzen, die über Text-Symbol-Differenzierung hinaus gehen	AR	43	5.18	46	5.66	0.48
	HMD	39	5.18	63	7.95	2.78
3.3.1 Zweifel an den (M)ER	AR	3	6.98	3	6.52	-0.46
	HMD	0	0.00	9	14.29	14.29

3.3.2 Inhaltliche Bewertung der (M)ER	AR	40	93.02	43	93.48	0.46
	HMD	39	100.00	54	85.71	-14.29

Anmerkung. H_n = Absolute Häufigkeit; h_n = relative Häufigkeit; T = Teilchen; S = Stoff

Tabelle A47. Häufigkeitsanalyse Unter- und Subkategorien zu 3.2 (Kat 2) im Gruppenvergleich, HMD-AR- vs. AR-Gruppe (N = 40) mit Differenzierung zwischen Prä- und Posttest sowie der Zu- bzw. Abnahme des Elaborationsverhaltens.

Unter-/Subkategorie zu 3. (KAT 2)		Prä-Test		Post-Test		Ab-/Zunahme
		H_n	h_n [%]	H_n	h_n [%]	$h_{n\text{ Post}} - h_{n\text{ Prä}}$ [%]
3.2 Inferenzen (Aufbau Situationsmodell)	AR	79	9.52	63	7.75	-1.77
	HMD	73	9.69	54	6.82	-2.88
3.2.1 Schlussfolgerung unter Verwendung der gegebenen (M)ER	AR	72	91.14	50	79.37	-11.77
	HMD	68	93.15	44	81.48	-11.67
3.2.1.1 Schlussfolgerung mit Text	AR	38	52.78	17	34.00	-18.78
	HMD	39	57.35	23	52.27	-5.08
3.2.1.2 Schlussfolgerung mit Symbol	AR	31	43.06	24	48.00	4.94
	HMD	23	33.82	18	40.91	7.09
3.2.1.3 Schlussfolgerung mit Text-Symbol	AR	3	4.17	9	18.00	13.83
	HMD	6	8.82	3	6.82	-2.01
3.2.3 Diagnose eigener Fehler	AR	7	8.86	13	20.63	11.77
	HMD	5	6.85	10	18.52	11.67
3.2.3.1 Diagnose mit Text	AR	4	57.14	6	46.15	-10.99
	HMD	4	80.00	4	40.00	-40.00
3.2.3.2 Diagnose mit Symbol	AR	3	42.86	6	46.15	3.30
	HMD	1	20.00	5	50.00	30.00
3.2.3.3 Diagnose mit Text-Symbol	AR	0	0.00	1	7.69	7.69
	HMD	0	0.00	1	10.00	10.00

Anmerkung. H_n = Absolute Häufigkeit; h_n = relative Häufigkeit; T = Teilchen; S = Stoff

Hauptkategorie 4: Reduktion von Detailwissen durch Streichung

Tabelle A48. Häufigkeitsanalyse Unter- und Subkategorien zu 4. (KAT 2) im Gruppenvergleich, HMD-AR- vs. AR-Gruppe (N = 40) mit Differenzierung zwischen Prä- und Posttest sowie der Zu- bzw. Abnahme des Elaborationsverhaltens.

Subkategorie zu 4. (KAT 2)		Prä-Test		Post-Test		Ab-/Zunahme
		H_n	h_n [%]	H_n	h_n [%]	$h_{n\text{ Post}} - h_{n\text{ Prä}}$ [%]
4.1 Schwerpunktsetzung	AR	71	64.55	74	81.32	16.77
	HMD	78	61.90	70	74.47	12.56
4.1.1 Text	AR	61	85.92	52	70.27	-15.65
	HMD	61	78.21	45	64.29	-13.92
4.1.2 Symbol	AR	7	9.86	16	21.62	11.76
	HMD	12	15.38	20	28.57	13.19
4.1.3 Text-Symbol	AR	3	4.23	6	8.11	3.88
	HMD	5	6.41	5	7.14	0.73
4.2 Detailreduktion	AR	21	19.09	4	4.40	-14.70
	HMD	22	17.46	11	11.70	-5.76
4.2.1 Text	AR	18	85.71	4	100.00	14.29
	HMD	14	63.64	7	63.64	0.00
4.2.2 Symbol	AR	3	14.29	0	0.00	-14.29
	HMD	8	36.36	4	36.36	0.00

4.3 Text-Symbol-Zusammenfassung	AR	18	16.36	13	14.29	-2.08
	HMD	26	20.63	13	13.83	-6.81

Anmerkung. H_n = Absolute Häufigkeit; h_n = relative Häufigkeit; T = Teilchen; S = Stoff

A.4 Elektronischer Anhang

A.4.1 AR-Lernumgebung (Android-Version)

A 4.2 Auswertungen des Datenmaterials

A.4.2.1 Vorstudie

A.4.2.2 Hauptstudie 1

A.4.2.3 Hauptstudie 2

DANKSAGUNG

An dieser Stelle möchte ich mich herzlich bei allen Menschen bedanken, die mich in den letzten Jahren - vor allem in den letzten Monaten und Wochen - unterstützt haben und in vielfältiger Weise zum Gelingen dieser Dissertationsarbeit beigetragen haben.

Mein besonderer Dank gilt zunächst Frau Prof. Dr. Claudia Nerdel für die hervorragende Erstbetreuung und die enorme Unterstützung bei der Durchführung und Umsetzung der gesamten Arbeit. Danke für die Möglichkeit AR in mein Promotionsprojekt einbinden zu können. Als meine wissenschaftliche Mentorin haben Sie mich bereits im Studium für den Umgang mit (M)ER begeistert. Ich danke Ihnen für die unendlich vielen Anregungen, die fruchtbaren Diskussionen, die konstruktiven Hilfestellungen und die fachkundigen, immer vielversprechenden Ratschläge. Die Gespräche auf intellektueller und persönlicher Ebene haben mich stets bereichert, Ihr Vertrauen und Zuspruch hat mich stets motiviert.

Ich danke Herrn Prof. Dr. Sebastian Habig für die Zweitbetreuung dieser Arbeit.

Besonders danken möchte ich Frau Prof. Dr. Cornelia Gräsel für die Drittbetreuung, den konstruktiven Austausch, die kritische Auseinandersetzung mit meinen methodischen Fragen und die freundlichen Hilfestellungen.

Auch danke ich herzlich meiner Mentorin Frau Prof. Dr. Maria Bannert sowie Herrn Prof. Dr. Karsten Stegmann für die Unterstützung in meinem Promotionsprojekt.

Ich danke meinen Kolleginnen und Kollegen der Professur für Fachdidaktik Life Sciences und des DigitUS-Projekts für ein herzliches Miteinander, die gute Zusammenarbeit und vielfältige Unterstützung. Ihr habt für viele lustige Momente im Arbeitsalltag gesorgt.

Stefan Witzke gebührt mein herzlicher Dank. Mit großer Bereitschaft hast du dich meinen Überlegungen angenommen und mir mit Problemlösungen, Zustimmung und kritischen Anmerkungen sehr weitergeholfen. Du hattest stets ein offenes Ohr und hast mich selbst in den stressigsten Situationen zum Lachen gebracht.

Eike Klausing danke ich für die hervorragende Zusammenarbeit im Rahmen der süLG-Arbeitsgruppe, dem kreativen Austausch und für seine aufmunternden und zusprechenden Worte.

Auch möchte ich mich bei meinen fleißigen wissenschaftlichen Hilfskräften bedanken. Ich danke Abhinav Kumar Challa und Rohan Fernandez für die technischen Programmierarbeiten. Dank euch konnten meine Ideen und Vorstellungen der Apps in die Realität umgesetzt werden. Ihr wart immer erreichbar und habt bei technischen Schwierigkeiten – insbesondere während der Datenerhebung – tatkräftig geholfen und den Transfer auf die AR-Brille möglich gemacht. Benedict Ohmann und Hana Alibabic möchte ich für die zuverlässige Unterstützung bei der Datenaufbereitung und –auswertung sowie Formatierung und der Erledigung vieler anderer

Aufgaben danken. Ihr habt mir stets pflichtbewusst unter die Arme gegriffen und mich vor allem in den letzten Wochen sehr entlastet.

Mein herzlichster Dank gebührt den vielen Lehrkräften, die an dieser Studie teilgenommen haben und durch die sorgfältige Bearbeitung der Fragebögen, Testaufgaben und Lernumgebungen wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, sowie den Ansprechpartnern der unterschiedlichen Schulen.

Auch danke ich den hilfsbereiten Kolleginnen und Kollegen sowie Freunden, die es auf sich genommen haben, Teile dieser Arbeit Korrektur zu lesen, Mängel im Ausdruck auszumerzen und auf Unverständlichkeiten hinzuweisen. Insbesondere Karin Schall möchte ich an dieser Stelle danken. Du hast als meine persönliche Korrekturleserin die Genese meines Forschungsdesiderats bereits seit dem Studium mitverfolgt und mich bei allen Abschlussarbeiten, nun auch bei dieser Dissertation, unterstützt. Dafür sei dir herzlich gedankt.

Mein zutiefst empfundener Dank gilt meiner Familie und meinen Freunden. Ich danke euch von ganzem Herzen für eure Unterstützung auf allen Ebenen. Ich danke euch für eure Hilfe in Wort und Tat, eure Rücksichtnahme und uneingeschränkten Aufmunterungen. Ein besonderer Dank geht an meine lieben Mädels - Ich danke euch für den Zuspruch und die Motivation, für euer Verständnis bei der Anfertigung dieser Doktorarbeit sowie die Begeisterung und Freude, die ihr mir entgegengebracht habt, wenn ich „mal wieder“ über die „Diss“ gesprochen habe. Euer moralischer Beistand und der menschliche Halt haben mir Kraft und Mut zur Anfertigung und Vollendung meiner Dissertation gegeben.

Außerordentlich möchte ich meinen Eltern Angelika und Gerhard Ripsam für ihre unermüdliche Unterstützung und Fürsorge danken. Euer unerschütterlicher Glaube an mich und meine Fähigkeiten haben mir stets Mut gegeben. Mein voller und besonders herauszustellender Dank geht an meinen Vater, dessen Inspiration und Weisheit von unschätzbarem Wert für mich sind und immer sein werden. Durch ihn durfte ich meine Leidenschaft für die Naturwissenschaft und Technik entdecken und entfachen. Die Gespräche mit ihm und seine Begeisterung haben mich immer angespornt mich weiterzuentwickeln und das Beste aus mir herauszuholen. Ihm möchte ich diese Arbeit widmen.

DANKE!