



Technische Universität München
TUM School of Social Sciences and Technology

Kompetenzanforderungen der Additiven Fertigung im Bauwesen –

Explorativ-empirische Forschungsarbeit innerhalb des DFG-geförderten Vorhabens TRR277

Tobias Ludwig

Vollständiger Abdruck der von der TUM School of Social Sciences and Technology der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Philosophie (Dr. phil.) genehmigten Dissertation.

Vorsitz: Prof. Dr. Alfred Riedl

Prüfende der Dissertation:

1. Prof. Dr. Daniel Pittich
2. Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter
3. Prof. Dr. Ralf Tenberg

Die Dissertation wurde am 02.10.2024 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die TUM School of Social Sciences and Technology am 03.02.2025 angenommen.

Danksagung – Weiterentwicklung durch Promotion

Mit einer Dissertation bzw. einer Forschungsarbeit über mehrere Jahre hinweg sind nicht nur die (Weiter-)Entwicklungen von Technologien und/oder Theorien betroffen, sondern auch die persönliche Weiterentwicklung. Mit einem Versuch, diese zu beschreiben, können unterschiedliche Facetten konkretisiert werden:

Als Erstes ist hier die fachliche und methodische Weiterentwicklung zu nennen, bei der man sich über einen längeren Zeitraum intensiv mit den Dissertationsthemen auseinandersetzt und zahlreiche Kurse der TUM Graduate School zu Forschungsmethodik, Forschungsqualität etc. wahrnimmt. Für diese Forschungsarbeit von hoher Bedeutung – und damit der erste Dank an Herrn Arend von QMB-MA – war der spezifische, zweitägige Workshop zur Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse.

Weiter ist die soziale und kommunikative Weiterentwicklung zu nennen. Durch die Teilnahme an Symposien, (Arbeits-)Tagungen und Networking-Sessions, aber auch beim gemeinsamen Ausklang am Abend lernt man im Verlauf des Promotionsvorhabens viele neue Personen mit ähnlichen Interessen kennen und kann zudem die eigenen Themen und Arbeiten im Rahmen von Vorträgen, Fortbildungen oder auch in der hochschulischen Lehre präsentieren. Hinzu kommt die Zusammenarbeit mit den Ingenieurkolleginnen und -kollegen sowie den Studierenden. Besonderer Dank geht dabei an Daniel Talke und Birger Buschmann für die gemeinsame Datenerhebung, die wertvollen Ideen und andauernden „Diskussionen“, die letztendlich nötig waren, um das Beste aus der Forschungsarbeit zu machen. Zudem geht ein Dank an Johanna Müller, Bettina Saile, Friedrich Herding sowie weitere Projektmitglieder des TRR277, die mit ihren Expertisen und ihren Arbeiten sowie an den Quartalsmeetings ein sehr angenehmes, positives Feld zur Datenerhebung bereitstellten. Ebenfalls geht ein Dank an Christina Borowsky, die mit ihrer Masterarbeit zur Reliabilitätsprüfung der Instrumente einen hochwertigen Beitrag zur Dissertation geleistet hat.

Abschließend bleibt noch die personelle Weiterentwicklung zu nennen, die sich durch das Aufgreifen neuer Verständnisse und Zusammenhänge, neuer Logiken, Denkweisen und Perspektiven zeigt und über den länger andauernden Prozess auch mit motivationalem Durchhaltevermögen verbunden ist.

Diesen Entwicklungsprozess unterstützen und mit Feedback begleiten sowie die Höhen und Tiefen miterleben durften mein Doktorvater Herr Prof. Dr. Daniel Pittich und mein Mentor Prof. Dr. Alfred Riedl. An dieser Stelle möchte ich mich nochmals bei euch bedanken und auch meine Wertschätzung ausdrücken, da ich froh darüber war und nach wie vor bin, einen engen Kontakt zu euch pflegen zu dürfen – welcher maßgeblich alle Teilfacetten meiner Weiterentwicklung beeinflusst hat. In diesem Kontext danke ich Herrn Prof. Dr. Ralf Tenberg für seine stets verfügbare Unterstützung und sein qualitativ hochwertiges Feedback. Am Ende bleibt noch dem gesamten Team der Professur für Technikdidaktik zu danken, für eure Expertisen, den Rückhalt, den Spaß und die schöne gemeinsame Zeit.

Zusammenfassung

Der Additiven Fertigung im Bauwesen (AMC) werden aktuell enorme Potenziale zugewiesen und die innovativen Technologien bzw. Verfahren können als ein Meilenstein in der Weiterentwicklung der bisher überwiegend tradierten Bauprozesse angesehen werden (Kloft et al., 2021). Mit deren Entwicklung und Implementierung gehen nicht nur Veränderungen der Produktion, sondern auch Veränderungen der Tätigkeiten – von komplexen Analysen, Fehler- und Schwachstellenbeseitigung bis hin zur Verarbeitung neuer Informationen – einher (Pittich et al., 2019). Die Fachkraft und ihre Kompetenzen stellen hierbei einen der zentralen Faktoren für die spätere Implementierung und Umsetzung neuer Fertigungstechnologien dar (Tenberg & Pittich, 2017).

Die zweistufige Forschungsbilanzierung zu Kompetenzen in der 1) Additiven Fertigung im Bauwesen (n = 24 Funde) und der 2) Additiven Fertigung (n = 492 Funde) zeigt spezifische Themen- und Forschungsausrichtungen auf. Relevante, kompetenzbezogene bzw. qualifikatorische Literaturen weisen zumeist offene Fragen in der kompetenztheoretischen Fundierung auf. Weitere beziehen sich lediglich auf den in der betrieblichen Praxis implementierten technologischen Stand, sind als prognostische bzw. allgemein gehaltene Studien angelegt oder nutzen lediglich 3D-Simulationen und additiv gefertigte 3D-Modelle zur besseren Darstellung. Um dem schmalen und deutlich verkürzten Forschungsstand zu begegnen, hat die qualitative, explorativ-empirische Forschungsarbeit die fundierte Erschließung von Kompetenzanforderungen der additiven Fertigung am Beispiel des Bauwesens zum Ziel und setzt entlang dreier Forschungsfragen bereits bei der Entwicklung der Verfahren an. Das methodische Vorgehen leitet sich dabei aus einem theorie-integrativen Arbeitsmodell einschlägiger, fundierter Theorien sowie praxisorientierter Ansätze ab und führt über vier Phasen mit insgesamt 31 Schritten zur sukzessiven Beantwortung der Fragestellungen. Der hier entwickelte Forschungsansatz wird im Rahmen der Arbeit pilotiert, entlang von Gütekriterien überprüft sowie in zwei spezifischen AMC-Verfahren des DFG-Projekts TRR277 umgesetzt.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Tätigkeiten zur Vorbereitung im Vergleich zur Nachbereitung des Bauteils über die analysierten Verfahren hinweg einen deutlichen Schwerpunkt einnehmen und dabei der Mensch – gefolgt von der Maschine – die häufigsten Fehler verursacht. Die primär genannte Vermeidung von Fehlern bezieht sich dabei auf Schulungen und Einweisungen sowie die Entdeckung möglicher Fehler bei regelmäßigen oder stichprobenartigen Prüfungen bzw. Kontrollen. Aus den fachlich-methodischen Kompetenzprofilen geht hervor, dass insbesondere bei der Vorbereitung der Anlage und des Bauteils sowie im Druckvorgang selbst die vielschichtigen Verständniszusammenhänge eine exponierte Stellung einnehmen und in diesen – neben der Bauteil-Endkontrolle – auch vermehrt mögliche Prozessfehler auftreten können. Hinsichtlich der aktuellen Informationsverarbeitung wird häufig auf interne Daten zurückgegriffen sowie extern und intern kommuniziert.

Die in der Forschungsarbeit generierten Kompetenzprofile und auch die mit dem Ansatz absehbar weiteren Kompetenzprofile können unmittelbar in die Aus- und Weiterbildungs- bzw. Qualifizierungsprogramme eingebettet werden und für die fachlich-methodische Kompetenzentwicklung der Fachkräfte von morgen eingesetzt werden.

Inhaltsverzeichnis

1	Themenhinführung und -begründung	6
1.1	Einleitung.....	6
1.2	Forschungsbilanzierung	8
1.3	Übergeordnete Forschungsfrage und Studiendesign	13
2	Theoretische Leitlinien	14
2.1	Kompetenztheoretische Hintergründe	14
2.1.1	Technikdidaktisches Kompetenzmodell.....	14
2.1.2	Wissensarbeit und Informationsverarbeitung.....	21
2.1.3	Kompetenzdiagnostik	29
2.2	Additive Fertigung	34
2.2.1	Fertigungsverfahren und -methoden im Bauwesen.....	34
2.2.2	Normentwurf zur Qualitätssicherung.....	38
2.3	Analyse(-ansätze) technischer Prozesse und Arbeitstätigkeiten.....	40
2.3.1	Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA)	40
2.3.2	Mensch–Technik–Organisations-Ansatz (MTO).....	49
2.3.3	Arbeitssysteme.....	52
2.3.4	Arbeitsablaufplan.....	60
3	Konkretisierung der Forschungsarbeit	63
3.1	Forschungsfragen und Forschungsziele.....	63
3.2	Theorie-Integration – Arbeitsmodelle	65
3.2.1	Teil 1: Strukturierung und Systematisierung der AMC-Prozesse	65
3.2.2	Teil 2: Informationsgenerierung und -nutzbarmachung	71
4	Forschungsansatz.....	74
4.1	Methodisches Vorgehen.....	74
4.1.1	Phase 0: Vorbereitung und Planung	75
4.1.2	Phase I: Prozessstrukturierung und -systematisierung	76
4.1.3	Phase II: Fehler- und Risikoanalyse	79
4.1.4	Phase III: Kompetenzanalyse/-generierung.....	82
4.1.5	Phase IV: Wissensarbeit und Informationsverarbeitung.....	87
4.2	Pilotierung des Forschungsansatzes	89
4.2.1	Erprobung und Verbesserungen	89
4.2.2	Pilotierungsergebnisse	90
4.2.3	Überprüfung entlang Gütekriterien qualitativer Forschung	106
4.3	Umsetzung im empirischen Feld.....	110

4.4	Ergebnisse und Befunde	111
4.4.1	Selektive Zementaktivierung (Teilprojekt A01)	111
4.4.2	Wire Arc Additive Manufacturing – WAAM (Teilprojekt A07)	126
5	Zusammenfassung, Diskussion und Ausblick	140
5.1	Reflexion und Aktualisierung zum Forschungsstand	140
5.2	Zusammenfassung und Diskussion zum Forschungsansatz	141
5.3	Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse	145
5.4	Ausblick	154
6	Literaturverzeichnis	157
7	Abbildungsverzeichnis	168
8	Tabellenverzeichnis	172
9	Abkürzungsverzeichnis	174
10	Anhang	175
	Handbuch zum Forschungsansatz – Umsetzung und Moderation	175
	Kompetenzmatrix: Selective Cement Activation (SCA) – Pilotierung	207
	Kompetenzmatrix: Selective Cement Activation (SCA)	217
	Kompetenzmatrix: Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM)	226

1 Themenhinführung und -begründung

1.1 Einleitung

Digitale Medien und Endgeräte sind mittlerweile zentraler Bestandteil aller Lebensbereiche. Das Privatleben wird beispielsweise durch die Nutzung von Smartphones und Tablets für Online-Banking oder auch mit innovativen Apps zur Steuerung eines Smart-Homes digital angereichert. Ähnliches lässt sich in etwas komplexerer Form auch im Arbeitsleben feststellen. Hier wird beispielsweise eine intelligente Vernetzung von Maschinen und Abläufen mithilfe von Informations- und Kommunikationstechnologie implementiert, um eine ressourcenschonendere, flexiblere und kundenzentrierte Produktion zu erreichen – Stichwort: Industrie 4.0. Wie bereits die Industrialisierung Ende des 19. Jahrhunderts gezeigt hat und aktuell durch die Industrie 4.0 wahrnehmbar ist, gehen mit der Entwicklung und Implementierung neuer Technologien nicht nur Veränderungen der Produktion, sondern auch Veränderungen der Tätigkeiten der Arbeitenden einher. Die vorwiegend operativ geprägten Tätigkeiten haben sich hin zu prozessbezogenen Problemlösungen entwickelt, wodurch die Anforderungen sowie die Komplexität an Facharbeit mit diesem Change der ‚Digitalen Transformation‘ stark zugenommen haben. Diesbezügliche Tätigkeiten gehen mit komplexen Analysen, Fehler- und Schwachstellenbeseitigung sowie mit der Verarbeitung neuer Informationen einher. Nur so kann eine operative Handlungsfähigkeit in den automatisierten und individualisierten Prozessen sichergestellt werden. Entscheidend – und damit auch Gelingens bedingend – hierfür sind umfangreiche fachliche, aber auch überfachliche Kompetenzen sowie Verständnisse der vielschichtigen Zusammenhänge. Anders ausgedrückt: Die Fachkräfte müssen in der Lage sein, die innovativen Produkte und Verfahren entlang der gesamten Wertschöpfungskette – vom Design bis hin zum fertigen, montierten Endprodukt – fachgerecht und kompetent zu handhaben. Das bedeutet, dass die Fachkraft und ihre Kompetenzen als einer der zentralen Faktoren für die Implementierung und Umsetzung der technischen Innovationen in der Berufs- und Arbeitswelt anzusehen sind und sowohl für die Sicherung als auch für den konsequenten Ausbau des Produktions- und Dienstleistungssystems sorgen. Sollte daher keine kompetente Handhabung der neuen Technologien in der täglichen Arbeitspraxis vorliegen, resultiert daraus einerseits eine ineffiziente und teilweise auch riskante Nutzung und andererseits werden die Potenziale, die eine neue Technologie mit sich bringt, nicht vollumfänglich ausgeschöpft. Ferner kommt hinzu, dass zusammen mit einer rasant fortschreitenden Entwicklung der Technologien gegenüber deren Implementierung ein sogenannter „Innovationsstau“ ausgelöst werden kann. Um den eben beschriebenen Effekten entgegenzuwirken und damit auch potenziell die Wettbewerbsfähigkeit zu sichern, müssen die Kompetenzanforderungen der Menschen bereits in unmittelbarer Anbindung an die Entwicklungen der innovativen Technologien gründlich erforscht werden.

Aktuell werden im Bereich der additiven Fertigung – mitunter als 3D-Druck bezeichnet – neue Technologien und Verfahren entwickelt bzw. stetig weiterentwickelt. Die Besonderheit dieser Fertigungsmethode liegt darin, dass die Herstellung eines Produktes „allein durch den digital gesteuerten schichtenweisen Werkstoffauftrag, ohne vorangehenden Formenbau oder

nachlaufenden [...] Umformprozess“ (Kloft et al., 2021, S. 222) erfolgt. Demnach lassen sich mit der Additiven Fertigung (Additive Manufacturing; kurz: AM) frei geformte, individualisierte Produkte mit hoher Gestaltungsfreiheit herstellen. Das Material wird dabei nur dort aufgetragen, wo es strukturell oder funktionell erforderlich ist, und impliziert dadurch eine ressourceneffiziente Produktion. Was ursprünglich zur Herstellung von Prototypen gedacht war, entfaltet heute mit leistungsstarker Hard- und Software enorme Potenziale. Mit der Verwendung neuer Materialien bzw. Materialzusammensetzungen und der kontinuierlichen Verbesserung der Verfahren sowie deren Parameter steigt der Anspruch an Haltbarkeit, Qualität und Stabilität der hergestellten Produkte. Die 3D-Fertigungsverfahren zählen mittlerweile in Branchen wie beispielsweise dem Maschinenbau, der Medizintechnik oder der Luft- und Raumfahrttechnik, durchaus zum Stand der Technik. Auch für eine der bislang am wenigsten digitalisierten Branche, dem Bauwesen, sind bereits in unterschiedlichen (internationalen) Projekten die Potenziale und vor allem die Machbarkeit eines konsequenten Ausbaus von AMC (Additive Manufacturing in Construction) nachgewiesen (u. a. SFB Transregio TRR277). Zentraler Vorteil dieser Fertigungstechnologie für das Bauwesen ist, dass Automatisierung und Individualisierung nicht im Widerspruch zueinanderstehen und Bauwerke mit hoher Gestaltungsfreiheit (äußere Formgebung) sowie Ressourceneffizienz (innerer Strukturaufbau) erstellt werden können (Kloft et al., 2021, S. 929 f.). Damit kann AMC als ein Meilenstein in der Weiterentwicklung der bisher überwiegend tradierten Bauprozesse, wie beispielsweise dem Schalungsbau, angesehen werden (ebd.). Im Zuge dieser digitalen Transformation des Bauwesens werden jedoch die neuartigen technologischen Entwicklungen und Innovationen aktuell weitestgehend getrennt von den diesbezüglichen Handhabungs- oder Problemlöseanforderungen bzw. Kompetenzbedarfen der involvierten Fachexperten bearbeitet und erforscht (u. a. DFG, 2020; TUM, 2023).

1.2 Forschungsbilanzierung

Ausgehend von den einleitenden Bezügen wird sich dem vorliegenden Themenkomplex systematisch entlang einer Bilanzierung genähert und damit der aktuelle diesbezügliche Forschungsstand erschlossen. Die Bilanzierung erfolgt für den Zeitraum 2012 bis einschließlich 2021 in den Datenbanken von TUM OPAC, TUM OPACplus (hier insbesondere die Datenquelle ‚Scopus‘) und ERIC. Dabei werden alle Dokumentarten, ausgenommen Patente und Videos, herangezogen, die deutsch- und englischsprachig veröffentlicht wurden.

Entlang des spezifischen Themas ‚Additive Fertigung im Bauwesen‘ wird zunächst grundlegend bilanziert (Abbildung 1), ob und inwiefern aktuell Kompetenzen für AMC konkretisiert sind bzw. vorliegen. Hierzu werden im Suchvorgang 1.1 die Begriffe „Additive“, „Fertigung“ und „Bauwesen“ mit dem Operator „AND“ und den variierenden Schlagwörtern 1) „Kompetenz“, 2) „Lehre“, 3) „Curriculum“, 4) „Qualifikation“ untersucht. 1) ist direkt auf das Thema ausgerichtet; 2) und 3) fokussieren den lehr-/lernbezogenen Kontext, in welchem Kompetenzen konkretisiert sein sollten und, 4) adressiert den qualifikatorischen Rahmen, in welchem ebenfalls Ansätze von Kompetenzen enthalten sein können. Gleiches wird für Suchvorgang 1.2 mit den korrespondierenden englischen Begriffen „Additive“, „Manufacturing“ und „Construction“ sowie den variierenden Schlagwörtern „Competenc“, „Education“, „Curriculum“, „Qualification“ durchgeführt. Zudem wird das im englisch-sprachigen Raum geläufige Schlagwort „Skills“ ergänzt. Im Suchvorgang 1.3 werden bei gleichbleibenden Schlagwörtern die Begriffe in „3D-print“ und „Concrete“ bzw. „Steel“ recherchiert. Ausgehend von den Studien in den Datenbanken werden diese mit Suchvorgang 1.4 über Zitationen und Autoren angereichert. Die Untersuchung ergab n = 29 Treffer, davon fünf Überschneidungen.

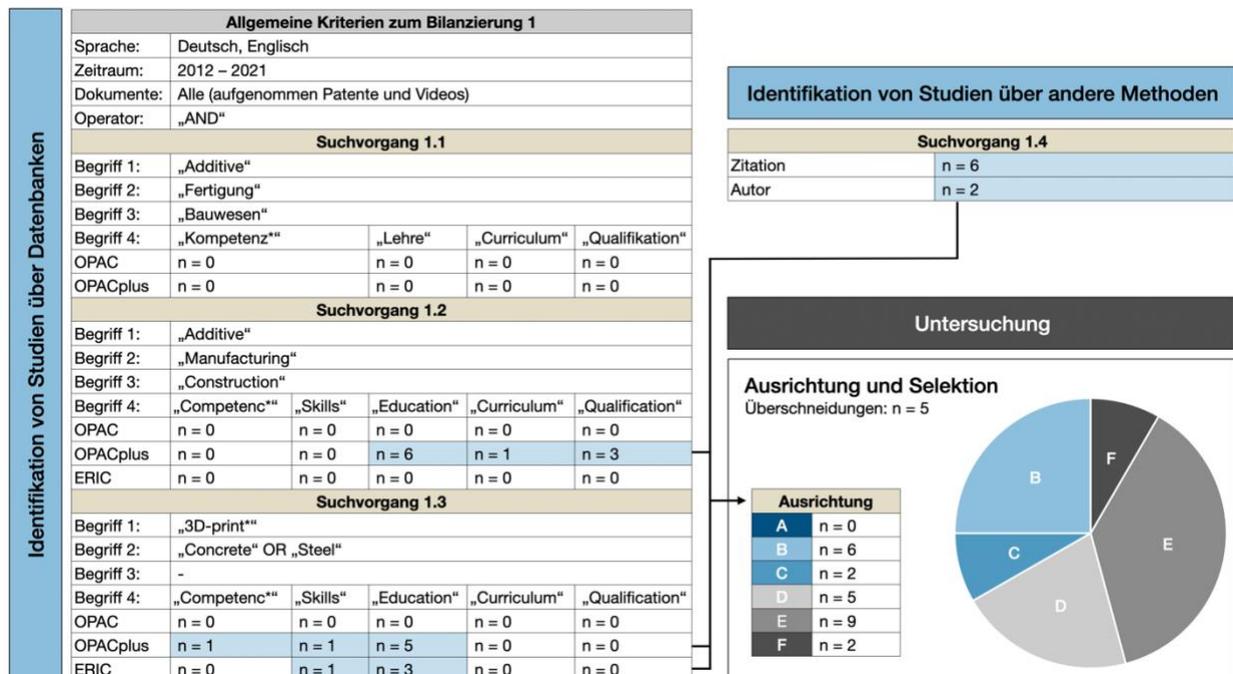


Abbildung 1: Bilanzierung 1 zu Additiver Fertigung im Bauwesen

Mit einem tieferen Blick in die Suchergebnisse lassen sich spezifische Ausrichtungen feststellen und die Literaturen entsprechend einordnen. Studien bzw. Werke, die adäquat und umfangreich Kompetenzen (A; n = 0) in der Additiven Fertigung im Bauwesen erschließen, liegen nicht vor. Literaturen mit lehr- und lernbezogener Ausrichtung (B; n = 6) beziehen sich lediglich auf konzeptionelle oder anwendungsbezogene Fallbeispiele (u. a. Chacon, 2021; Tihinen et al., 2021), verfolgen einen Ansatz, bei dem (Grundschul-)Lehrkräfte geschult werden, um die Selbstwirksamkeit zu steigern (u. a. Arslan & Erdogan, 2021), oder betrachten eine eher materialanalytische Lehrplanentwicklung (u. a. Knochel & Meeken, 2021). Auffällig ist dabei die eher oberflächliche Behandlung der Thematik ‚Kompetenzen‘ und das Fehlen eines zugrundeliegenden, fundierten Kompetenzverständnisses. Weiter zeichnet sich eine praxisbezogene Ausrichtung (C; n = 2) ab, welche sich im Unternehmenskontext auf Maßnahmen der Anwendung bezieht (u. a. Ohrenstein, 2019) oder Berufsrollen und Abläufe beschreibt (u. a. Benešová & Tupa, 2017). In den Untersuchungsergebnissen sind zudem Literaturen enthalten, die eher allgemein (D; n = 5) die Herausforderungen und Notwendigkeiten (u. a. Bos et al., 2016; Kirchheim et al., 2018) von additiver Fertigung adressieren und prognostisch die Veränderungen durch Technologien (u. a. Bergmann, 2020; Popescu et al., 2019) aufzeigen. Ferner lassen sich technik-/materialbezogene Ausrichtungen (E; n = 9) feststellen, welche diese Perspektive selten überschreiten und wenn auch nur begrenzt kompetenzbezogene Anhaltspunkte liefern (u. a. Gallego et al., 2020; Zafer et al., 2020). Zwei Literaturen wurden für den vorliegenden Kontext als themenferne Ausrichtung (F) eingestuft, da diese die Wahrnehmung von Studenten zu 3D-gedruckten Modellen (Marty et al., 2019) und Möglichkeiten des 3D-Drucks für Kleidung (Meeken, 2020) untersuchen.

Mit dieser Erkenntnis wird die Bilanzierung (Abbildung 2) ausgeweitet und fokussiert in einem zweiten Suchvorgang, ob und inwiefern aktuell Kompetenzen bzw. Kompetenzansätze im allgemeinen Bereich der additiven Fertigung vorliegen. Hierzu werden lediglich die Begriffe „Additive“ und „Fertigung“ bzw. „Additive“ und „Manufacturing“ sowie nur „3D-print“ angepasst. Die Untersuchung ergab n = 493 Literaturbezüge, wobei 251 Überschneidungen in den Schlagwörtern und den Datenbanken nicht mehrfach aufgenommen wurden. Bezüglich des Schlagwortes „Education“ in Suchvorgang 2.3 wurden weitere Spezifizierungen getroffen und innerhalb ‚OPACplus‘ (n = 421) nur Literaturen aufgenommen, die „peer-reviewed“ und der „Education & Educational Sciences“ zugeordnet sind. Zudem wurde in der Datenbank ERIC (n = 197) mit den zusätzlichen Deskriptoren „Education“ und „Printing“ eine Spezifizierung vorgenommen, da diese in direktem Bezug zu den Schlagwörtern stehen. Die Suchergebnisse konnten hierbei ebenfalls unterschiedlichen Ausrichtungen zugeordnet werden.

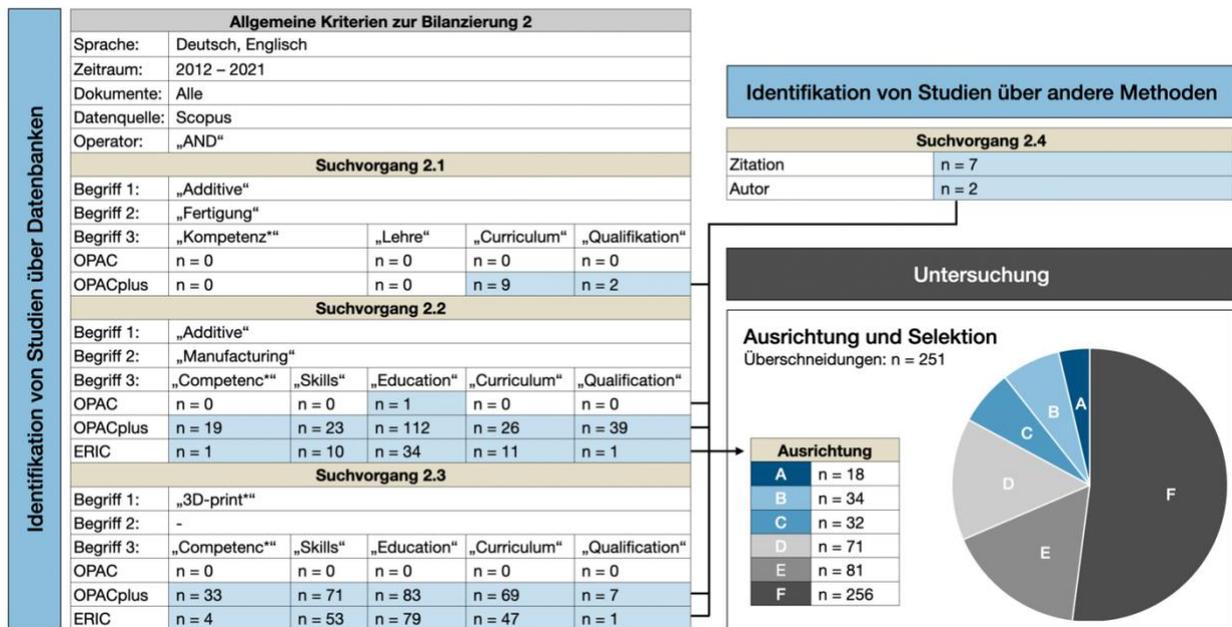


Abbildung 2: Bilanzierung 2 zu Additiver Fertigung

Wie in Abbildung 2 hinsichtlich der Untersuchung deutlich zu erkennen ist, sind für den vorliegenden Kontext eine Vielzahl an Literaturen der themenfernen Ausrichtung (F; n = 256) zugeordnet. Dies begründet sich durch die Tatsache, dass hierunter Literaturen zuzuordnen sind, die die Verwendung von 3D-gedruckten Modellen für den Unterricht bzw. in der Lehre (u. a. Frithioff et al., 2021; Noël et al., 2021) untersuchen oder die 3D-Druck-Technologie als „Mittel zum Zweck“ für einen lehrbezogenen Einsatz (u. a. Novak et al. 2021; Levin & Verner, 2021) nutzen, ohne tiefgreifende Verständnisse der Technologien zu vermitteln bzw. der Fokus nicht auf die Vermittlung AM-spezifischer Kompetenzen gerichtet ist. Weiter sind hier Studien zugeordnet, die für den vorliegenden Themenkomplex keine Erkenntnisse liefern, wie beispielsweise die Förderung der räumlichen Fähigkeiten oder des räumlichen Denkens (u. a. Choo et al., 2021; Dilling & Vogler, 2021) u. v. m. In der zweiten Bilanzierung konnte ebenfalls eine rein technische bzw. technik- und materialfokussierte Ausrichtung (E; n = 81) an Literaturen festgestellt werden (u. a. Chen, 2021; Gibbons et al., 2021), welche keine fundierten kompetenzbezogenen Zugänge aufzeigen. Die Ergebnisse der eher allgemeinen Ausrichtung (D; n = 71) beschreiben wiederum mögliche Auswirkungen oder Trends (u. a. Geerts & Renda, 2019; Motyl & Filippi, 2021), geben einen Überblick bzw. Einblick in die additive Fertigung (u. a. Abdullahi et al., 2021; Kamara & Faggiani, 2021) oder beschreiben mögliche Potenziale (u. a. Kim et al., 2021). Weiter sind Studien zu nennen, welche die aktuelle Praxis (C; n = 32) aufgreifen und hierzu spezifische Anwendung aufzeigen (u. a. Gharleghi et al., 2021; Guarino et al., 2021). Diese sind eher als ‚analytische Bestandsaufnahme‘ angelegt, ohne konkrete, fundierte Kompetenzen zu explizieren. Der lehr-/lernbezogenen Themenausrichtung (B; n = 34) sind Studien und Literaturen zugeordnet, die 1) interdisziplinäre Lehrkonzepte (u. a. Colorado et al., 2021; Reymus et al., 2021), 2) Professionalisierungsansätze von Lehrkräften (u. a. Novak & Wisdom, 2018; Suturs, 2021) sowie 3) Modelle zur Lehrplanentwicklung (u. a. Lensing &

Friedhoff, 2018; Pikkarainen & Piili, 2020) präsentieren. Dabei konnte in 1) die explizite Aufführung AM-bezogener Kompetenzen nicht festgestellt werden; 2) adressieren insbesondere Grundschullehrkräfte und versuchen, bereits bekannte naturwissenschaftliche Hemmschwellen bzw. Selbstwirksamkeit mittels der additiven Fertigung zu überbrücken und stellen keine adäquate fachlich-technische Professionalisierung dar; 3) bewegen sich primär auf konzeptioneller, materialanalytischer Ebene. Hervorzuheben ist an dieser Stelle jedoch eine Studie, die sich mit der Entwicklung eines Lehrplans für das „Internet-of-Things-Labor“ beschäftigt. Lensing und Friedhoff (2018) präsentieren darin einen Ansatz zur Identifizierung von Kompetenzanforderungen (Abbildung 3), konkretisieren hierzu Kompetenzprofile und greifen auf ein fundiertes, dispositionales Kompetenzverständnis nach Erpenbeck und Rosenstiel zurück. Die Kompetenzprofile stützen sich dabei auf potenzielle Quellen, bestehend aus dem Fachwissen bzw. der professionellen Expertise der Arbeitsumgebung, Umfragen und Trendstudien in Bezug zur prognostizierten zukünftigen Arbeitsumgebung und den Evaluierungen aus Lehrveranstaltungen. Offene Fragen bestehen darin, inwieweit Kompetenzen auf allen drei Ebenen konsistent konkretisiert und ineinander zusammengeführt werden können. Ebenso ist zu klären, ob die prognostizierte Arbeitsumgebung mit der tatsächlichen Arbeits- und Lernumgebung übereinstimmt und ob das Fachwissen bzw. die professionelle Expertise mit den Trendstudien, Umfragen und den Evaluierungen aus den Lehrveranstaltungen konsistent zusammen- bzw. fortgeführt werden kann. In Hinblick auf ein adaptives Curriculum zu einem (offenen) „Internet-of-Things-Labor“ erscheint dieser pragmatische Ansatz auch vor dem Hintergrund aktuell eingesetzter Lernfabriken zweckmäßig und zielführend. Die Herangehensweise zur Identifizierung von Kompetenzanforderungen bzw. die Generierung von Kompetenzprofilen ist jedoch für den vorliegenden Fall und die absehbaren Veränderungen im Bauwesen verkürzt.

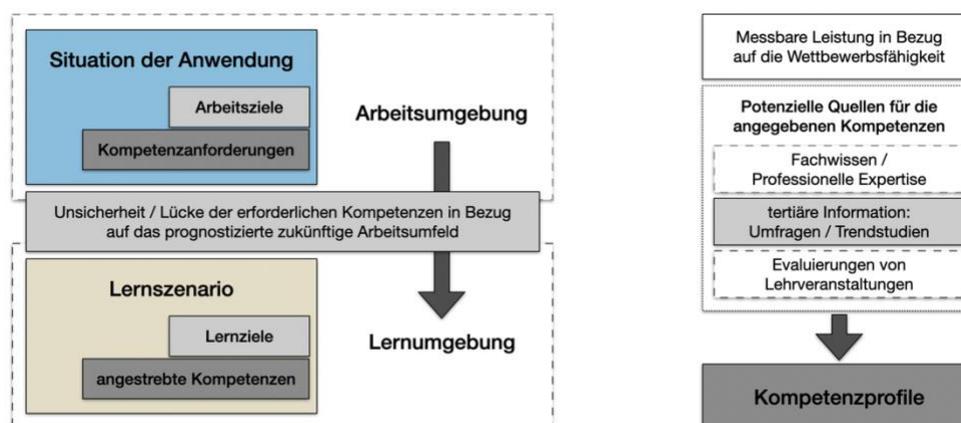


Abbildung 3: Modell zur Identifikation von Kompetenzanforderungen (vgl. Abbildung 1 (a) in (Lensing & Friedhoff, 2018, S. 233)

Die in Bilanzierung 2 zugeordneten Studien und Literaturen der Ausrichtung (A; n = 18), die 1) den Anspruch formulieren, dezidiert kompetenzbezogene bzw. qualifikatorische Aspekte von AM zu konkretisieren (u. a. Chandrashekar et al., 2020; Marschall, 2020; Marschall, 2016; Pei et al., 2019; Stavropoulos et al., 2020) sowie 2) allgemeingültig formulierte „Skills“ wie ‚Data

communications and network', 'Cybersecurity', 'Digital skills' u. v. m. (vgl. Hernandez-de-Menendez et al., 2020, S. 1515 f.) bzw. 3) Kompetenzen eher als Tätigkeitsformulierungen (Daniel et al., 2018, S. 323) explizieren oder 4) einen materialanalytischen Ansatz über Literaturen und deren Anreicherung durch Aussagen von bzw. Interviews mit Experten (u. a. Despeisse & Minshall, 2017; Espera, 2019) verfolgen, begegnen dem Kompetenzanspruch – vor dem Hintergrund einer empirischen Sozialforschung – nur stark eingeschränkt. Dies ist ebenfalls durch das Fehlen eines Kompetenzverständnisses und -zugangs begründet. Zudem sind Literaturen (n = 9) zu nennen, die AM nicht ganzheitlich, sondern lediglich Teilfacetten/-bereiche (u. a. Barykin et al. 2020; Hwang et al. 2021; Salmi, 2021) betrachten und dabei zumeist nur (fertigungs-)spezifische Anhaltspunkte liefern.

Abschließend – ausgenommen von der Bilanzierung – ist zu erwähnen, dass sich die Beschreibungen von Personenqualifikationen in DIN-Normen ebenfalls lediglich auf einzelne Tätigkeiten beschränken. Exemplarisch zu nennen wäre hier der ‚Maschinenbediener‘, welcher die Tätigkeiten bzw. Handlungen zum Anlagestarten, zur Verwendung der Anlagensoftware, zum Entpacken und Entnehmen des Bauteils etc. ausübt (DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2018, S. 6). Ferner werden im Normentwurf DIN SPEC 17071:2019-12 zum ‚Bestandteil Personal‘ bereits erste Elemente wie „Verantwortlichkeiten, Kompetenzmatrix, kontinuierlicher Verbesserungsprozess“ (DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2019, S. 15) genannt, jedoch nicht weiter konkretisiert.

Zusammengefasst erscheinen die Studien und Literaturen aus drei Gesichtspunkten verkürzt:

- 1) Die prognostischen und allgemein gehaltenen Studien können aufgrund ihrer Ausrichtung nur bedingt konkrete und empirisch fundierte Orientierungspunkte für die Erschließung der Kompetenzanforderungen und die damit korrespondierende Ausgestaltung der Kompetenzentwicklung liefern.
- 2) Die qualifikatorischen Analysen beziehen sich hingegen auf den aktuellen, in der (betrieblichen) Praxis implementierten technologischen Stand von AM in spezifischen Domänen, welcher sich zwischenzeitlich jedoch weiterentwickelt und mit der Nutzung neuer Materialien und leistungsstarker Software ebenfalls verändert hat.
- 3) Die Qualifizierungs-/Kompetenz- bzw. Lehr-/Lernansätze beziehen sich auf bestimmte technologische Teilsegmente und weisen zumeist offene Fragen in der theoretischen Fundierung auf. Hierbei ist zu erwähnen, dass das Bauwesen gegenüber anderen Domänen – wie bspw. dem Maschinenbau oder der Medizin – deutlich unterrepräsentiert ist.

1.3 Übergeordnete Forschungsfrage und Studiendesign

Wie in der Forschungsbilanzierung (Kapitel 1.2) aufgezeigt, liegen bezüglich der Kompetenzen bzw. der Erschließung von Kompetenzanforderungen im Kontext von AMC und AM bislang kaum tragfähige und fundierte Befunde vor. Daher gilt es hier theoretisch sowie empirisch am Forschungsstand der kompetenzbezogenen Grundlagenforschung anzuschließen und damit den vorliegenden Bezugsraum zu erweitern. Für die vorliegende Forschungsarbeit ergibt sich hieraus das übergeordnete Forschungsziel, fundiert Kompetenzanforderungen bereits in der Entwicklung neuer Fertigungsverfahren und -methoden am Beispiel von AMC zu erschließen. Davon ausgehend leitet sich die übergeordnete Forschungsfrage ab:

Wie kann einer fundierten Erschließung von Kompetenzanforderungen bereits in der Entwicklung innovativer, prozessorientierter Technologien am Beispiel der Additiven Fertigung im Bauwesen begegnet werden?

Mit der Forschungsarbeit gilt es, die bandomänen- und kontextspezifischen AMC-Gegebenheiten integrativ zu erschließen und für Grundfragen spezifischer Kompetenzbedarfe im Bereich der Additiven Fertigung im Bauwesen nutzbar zu machen. Damit wird einerseits die Grundlagenforschung im Bereich technischer Kompetenzen und deren Diagnostik (domänen- und technologiespezifisch) erweitert sowie andererseits ein eigenständiges Segment an kontextspezifischer Grundlagenforschung generiert, welches als empirische Basis für aufbauende Entwicklungs- und Evaluationsstudien genutzt werden kann.

Wenngleich im Kontext von AM aus diversen Richtungen inzwischen einzelne empirische Zugänge vorgenommen wurden, können hier nur spezifische Befunde weiterführen, die in der Baudomäne und deren Gegebenheiten und Technologien verankert sind und die hier vorliegenden interdependenten Zusammenhänge in ihrer Komplexität explorieren. Die Untersuchungsmethodik zur Forschungsarbeit ist daher aufgrund des schmalen Forschungsstandes zum Thema Kompetenzbedarfe der additiven Fertigung (im Bauwesen) und der damit einhergehenden Grundlagenorientierung qualitativ sowie explorativ-empirisch ausgerichtet. Die fundierte Erschließung technischer Kompetenzen bzw. der erkennbaren Kompetenzbedarfe stellt dabei eine Zukunftsaufgabe (technikdidaktischer) Forschung dar.

Im Folgenden werden zunächst theoretische Leitlinien (Kapitel 2) aufgezeigt, wodurch die übergeordnete Forschungsfrage spezifiziert und ein theorie-integratives Arbeitsmodell (Kapitel 3) entwickelt werden kann. Das Arbeitsmodell mündet unmittelbar in den Forschungsansatz (Kapitel 4), welcher zum methodischen Vorgehen pilotiert und entlang der verwendeten Instrumentarien auf Gütekriterien qualitativer Forschung untersucht wird. Der Forschungsansatz wird an zwei weiteren AMC-Druckverfahren angewendet und generiert dadurch erste AMC-Kompetenzprofile. Diese Befunde werden dargestellt und abschließend zusammen mit dem Forschungsansatz reflektiert sowie diskutiert (Kapitel 5).

2 Theoretische Leitlinien

Die theoretischen Grundlagen der vorliegenden Forschungsarbeit lassen sich in drei Leitlinien kategorisieren. Als Ausgangspunkt und damit zur Schärfung der übergeordneten Zielperspektive beitragend werden in der ersten Leitlinie schlüssige und konsistente kompetenztheoretische Hintergründe (Abschnitt 2.1) konkretisiert. Daran anschließend werden in der zweiten Leitlinie die aktuellen technischen Gegebenheiten bzw. der Stand der Forschung bezüglich additiver Fertigungsverfahren und -methoden im Bauwesen abgebildet und erläutert (Abschnitt 2.2). Ausgehend von diesen beiden Grundzügen werden in der dritten Leitlinie (Analyse-)Ansätze zur Strukturierung und Systematisierung technischer Prozesse und Tätigkeiten (Abschnitt 2.3) präsentiert.

2.1 Kompetenztheoretische Hintergründe

Für die Erschließung von Kompetenzanforderungen ist es zunächst notwendig, ein Verständnis bzw. ein umsetzbares und fundiertes Modell zu Kompetenzen (Abschnitt 2.1.1) aufzuzeigen. Da die Veränderungen auch mit der Verarbeitung neuer Informationen einhergehen, werden mit Abschnitt 2.1.2 die Themen Wissensarbeit und Informationsverarbeitung adressiert. Abschließend wird ein entsprechender Zugang zur Kompetenzdiagnostik (Abschnitt 2.1.3) erläutert.

2.1.1 Technikdidaktisches Kompetenzmodell

Das technikdidaktische Kompetenzmodell stellt – nach umfangreicher Bilanzierung (Tenberg et al., 2019) – einen kompetenzorientierten Gesamtansatz dar, „der theoretisch fundiert, empirisch abgesichert, praktisch umsetzbar und messmethodisch überprüfbar ist“ (ebd., S. 90 f.). Der Ansatz gründet darauf, dass Kompetenzen (Abbildung 4) Ergebnisse von kurz-, aber auch langfristigen Entwicklungsprozessen sind, in denen vorhandene Humanressourcen aktiviert bzw. nutzbar gemacht werden (ebd., S. 94; Pittich & Ludwig, 2022, S. 1208). Die humanen Ressourcen sind dabei individuelle Grundlagen und Potenziale, die eine Person besitzt. Beispiele hierzu sind kognitive Voraussetzungen bzw. Intelligenz oder auch Traits, Motivationen und Interessen etc. Diese werden im Zusammenspiel mit Lernprozessen und auch Erfahrungen, also spezifischen Aktivierungen, zu Kompetenzen entwickelt (Tenberg et al., 2019, S. 94). Zur Klassifizierung der Kompetenzen greift das technikdidaktische Kompetenzmodell auf das fundierte Kompetenzverständnis nach Erpenbeck und Rosenstiel zurück.



Abbildung 4: Humane Ressourcen und Kompetenzen (vgl. Abbildung 14 in Tenberg et al., 2019, S. 94)

2.1.1.1 Kompetenzverständnis nach Erpenbeck und Rosenstiel

„Wenn Facharbeit von eigenständigem, situationsflexiblem, ausbau- und weiterentwicklungsfähigem Handeln geprägt ist, dann muss sie – gemäß der Definition von Erpenbeck & Rosenstiel – auf Basis von Kompetenzen erfolgen.“ (Tenberg et al., 2019, S. 95)

Erpenbeck und Rosenstiel prägen seit den 1990er Jahren ein Kompetenzverständnis, das sich auf die Selbstorganisation von individuellem Handeln gründet. Unter Verweis auf sprachwissenschaftliche Ansätze von Chomsky und motivationspsychologische Ansätze von White definieren sie Kompetenzen konkret als "Dispositionen selbständigen Handelns" (Erpenbeck & Rosenstiel, 2007, S. XIX). Erpenbeck und Rosenstiel unterscheiden hierbei verschiedene Kompetenzklassen, welche auf einem Beziehungssystem des selbstorganisierten Handelns (Abbildung 5) basieren. Geistige oder physische Handlungen beinhalten hierbei immer Subjekt-Objekt- oder Subjekt-Subjekt-Beziehungen (Tenberg et al., 2019, S. 95 f.). Selbstorganisiertes Handeln kann sich demnach auf 1) die handelnde Person selbst (P): Subjekt-Subjekt, 2) ihre Aktivität und Willenskomponenten des Handelns (A): Subjekt-Objekt oder Subjekt-Subjekt, 3) die gegenständliche Umwelt und deren fachliche und methodische Erfassung und Veränderung (F): Subjekt-Objekt oder 4) die soziale Umwelt, also andere Menschen und Gruppen (S): Subjekt-Subjekt beziehen (Erpenbeck & Rosenstiel, 2007, S. XXIII).

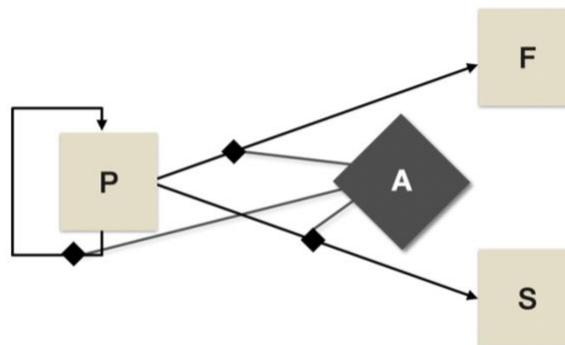


Abbildung 5: Darstellungen der Subjekt-Objekt- oder Subjekt-Subjekt-Beziehungen, aus denen sich die Selbstorganisationsdispositionen ableiten lassen (vgl. Abbildung 15 in Tenberg et al., 2019, S. 96 sowie Erpenbeck & Rosenstiel, 2007, S. XXI ff.)

„Bezieht sich selbstorganisiertes Handeln reflexiv auf die handelnde Person selbst (P), handelt es sich um ‚personale Kompetenzen‘, wird es durch Aktivität und Willenskomponenten des Handelnden näher charakterisiert (A) handelt es sich um aktivitäts- bzw. umsetzungsorientierte Kompetenzen, bezieht es sich auf eine gegenständliche Umwelt und auf deren fachlich-methodische Erfassung und Veränderung (F), handelt es sich um ‚fachliche und methodische Kompetenzen‘, bezieht es sich auf eine soziale Umwelt (S), handelt es sich um ‚sozial-kommunikative Kompetenzen‘“ (Tenberg et al., 2019, S. 94 sowie Erpenbeck & Rosenstiel, 2007, S. XXIII). Mit diesem Verständnis und den Beziehungen geht einher, dass Kompetenzen ein kontext- und domänenspezifisches Konstrukt sind, da diese eng mit Handlungsfeldern bzw.

Situationen und Gegebenheiten verbunden sind, in denen eine Person agieren kann (Tenberg et al., 2019, S. 82 f.).

2.1.1.2 Personale Kompetenzen

„Dispositionen einer Person, reflexiv selbstorganisiert zu handeln, d. h. sich selbst einzuschätzen, produktive Einstellungen, Werthaltungen, Motive und Selbstbilder zu entwickeln, eigene Begabungen, Motivationen, Leistungsvorsätze zu entfalten und sich im Rahmen der Arbeit und außerhalb kreativ zu entwickeln und zu lernen“ (Erpenbeck & Rosenstiel, 2007, S. XXIII).

Wie bereits aus der Definition hervorgeht, beziehen sich personale Kompetenzen darauf, sich selbst zu reflektieren, zu steuern und weiterzuentwickeln, um individuelles Verhalten in unterschiedlichen Kontexten zu ermöglichen. Diese Art der Kompetenzen fokussiert eine individuelle Selbstregulation sowie die persönliche Entwicklung und ermöglicht es einer Person, ihre Eigenschaften und Werte funktional einzusetzen und dysfunktionale Auswirkungen zu begrenzen (Tenberg et al., 2019, S. 117 f.). „Konkretisiert man dies für berufsförmige Arbeit, ergeben sich in motivationaler und volitionaler Hinsicht Selbstwirksamkeitserwartung, Handlungskontrolle, Lern- und Leistungsmotivation, in affektiver Hinsicht der Anspruch an die eigene Arbeit, betriebliche Identifikation und ‚commitment‘, Prozess- und Kundenorientierung, unternehmerisches und ökologisches Denken, Entwicklungsorientierung etc.“ (ebd., S. 118). Dies führt beispielsweise zu Eigenschaften wie Fleiß, Beharrlichkeit, Selbstvertrauen und Risikobereitschaft. Dabei sind „[g]emäß der Theorie von Erpenbeck & Rosenstiel [...] personale Kompetenzen nur indirekt handlungswirksam, vielmehr wirken sie als ‚Bezugsdispositionen‘ für fachlich-methodische, sozial-kommunikative, aktivitäts- und umsetzungsorientierte Kompetenzen“ (ebd., S. 117).

2.1.1.3 Aktivitäts- bzw. umsetzungsorientierte Kompetenzen

„Dispositionen einer Person, aktiv und gesamtheitlich selbstorganisiert zu handeln und dieses Handeln auf die Umsetzung von Absichten, Vorhaben und Plänen zu richten – entweder für sich selbst oder auch für andere und mit anderen, im Team, im Unternehmen, in der Organisation. Diese Dispositionen erfassen damit das Vermögen, die eigenen Emotionen, Motivationen, Fähigkeiten und Erfahrungen und alle anderen Kompetenzen – personale, fachlich-methodische und sozial-kommunikative – in die eigenen Willensantriebe zu integrieren und Handlungen erfolgreich zu realisieren“ (Erpenbeck & Rosenstiel, 2007, S. XXIII).

Im Kern der aktivitäts- bzw. umsetzungsorientierten Kompetenzen geht es darum, unterschiedliche Kompetenzen in praktischen Handlungssituationen professionell anzuwenden. Im Kompetenzmodell nach Erpenbeck und Rosenstil nehmen diese eine gesonderte Stellung ein, da diese Art von Kompetenzen – wie in Abbildung 5 und in der Definition skizziert – in

unmittelbarem Zusammenhang mit den anderen Kompetenzdimensionen steht. Ferner können diese auch als „fallspezifische Integration“ der unterschiedlichen Kompetenzdimensionen verstanden werden (Abbildung 6).

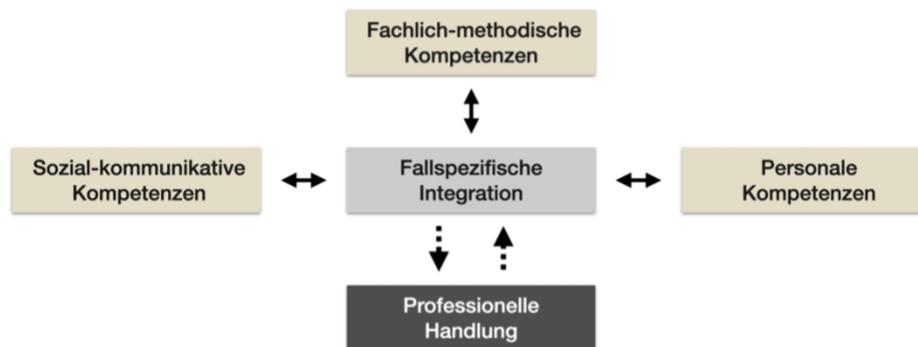


Abbildung 6: Aktivitäts- und umsetzungsorientierte Kompetenzen als ‚fallspezifische Integration‘ unterschiedlicher Kompetenzdimensionen (vgl. Abbildung 25 in Tenberg et al., 2019, S. 129)

Fallspezifische Integration bedeutet kurz, eine professionelle Handlung mit den zugrundeliegenden Kompetenzen situationsgerecht anzuwenden. Dies betrifft sowohl die fachlichen und methodischen Aspekte als auch sich selbst zu führen – personale Kompetenzen – und mit anderen zu interagieren – sozial-kommunikative Kompetenzen – (Tenberg et al., 2019, S. 129 f.). Durch die Integration dieser Kompetenzen kann eine Person fundierte und effektive Entscheidungen treffen, die zu einer professionellen Handlung führen.

Wenngleich bei den aktivitäts- bzw. umsetzungsorientierten Kompetenzen volitionale und motivationale Aspekte mitschwingen und bislang zu diesem Kompetenzbereich keine systematische Forschung erkennbar ist (ebd., S. 130), erscheint es dennoch plausibel, dass es hierbei im Kern darum geht, erworbene Kompetenzen – unterschiedlicher Kompetenzdimensionen – in praktischen Handlungssituationen professionell anzuwenden bzw. dieses Handeln an verschiedene Kontexte und Anforderungen anzupassen. Dadurch hebt der Kompetenzansatz die Relevanz von Aktivität und Umsetzung hervor und betont zudem, dass Kompetenz nicht ausschließlich wissensbezogen ist, sondern darin besteht, relevantes Wissen in praktischen Handlungen anzuwenden (Pittich, 2013; Tenberg et al., 2019).

2.1.1.4 Fachlich-methodische Kompetenzen

„Dispositionen einer Person, bei der Lösung von sachlich-gegenständlichen Problemen geistig und physisch selbstorganisiert zu handeln, d.h. mit fachlichen und instrumentellen Kenntnissen, Fertigkeiten und Fähigkeiten kreativ Probleme zu lösen, Wissen sinnorientiert einzuordnen und zu bewerten; das schließt Dispositionen ein, Tätigkeiten, Aufgaben und Lösungen methodisch selbstorganisiert zu gestalten, sowie die Methoden selbst kreativ weiterzuentwickeln“ (Erpenbeck & Rosenstiel, 2007, S. XXIII).

Fachlich-methodische Kompetenzen, wie bereits aus der Definition hervorgeht, sind relevant, um bei sachlich-gegenständlichen Problemen eigenständig, kreativ und selbstorganisiert zu handeln. Im Kontext technischer Berufe beziehen sich diese Kompetenzen also darauf, dass Fachkräfte grundlegend ihre beruflichen Aufgaben bewältigen und den Herausforderungen begegnen können. Da in beruflich-technischen Domänen die fachlich-methodischen Kompetenzen eine exponierte Stellung einnehmen, standen insbesondere diese in den letzten Jahren im Fokus technikdidaktischer Forschung (Pittich, 2013). Diesbezüglich wurde unter der Zusammenführung sowie Vereinfachung der Theorien von Erpenbeck und Rosenstiel (2007) und Renkl (1994, 1996) ein qualitativer Zusammenhang von Wissen – als Hauptdisposition – und Handeln hergestellt (Pittich, 2013). Ergebnis davon ist ein theoretisch fundiertes sowie empirisch abgestütztes Arbeitsmodell (Abbildung 7) zu fachlich-methodischen Kompetenzen, welches das Zusammenspiel einzelner Wissensarten in Bezug auf berufliche Handlungen und deren Freiheitsgrade erschließt (ebd., S. 70).

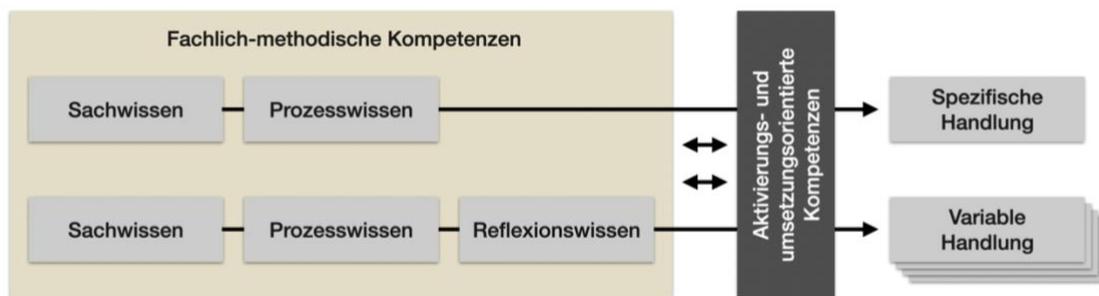


Abbildung 7: Angepasstes Arbeitsmodell fachlich-methodischer Kompetenzen (vgl. Pittich, 2013 sowie Abbildung 22 in Tenberg et al., 2019, S. 109)

„Handwerker*innen oder Facharbeiter*innen sind entsprechend der Darstellung in der Lage, aufgrund von Sach- und Prozesswissen eine spezifische Handlung auszuführen. [...] Die Reichweite bzw. eine flexible Anwendbarkeit, also die Variabilität des Handelns ist dabei eingeschränkt. Um zu einer variablen, d.h. flexiblen und selbstständig erweiter- und veränderbaren Handlungsfähigkeit zu kommen, ist Reflexionswissen erforderlich“ (Tenberg et al., 2019, S. 109). Diese Wissensarten sind definiert als:

- Sachwissen ist ein „anwendungs- und umsetzungsunabhängiges Wissen über Dinge, Gegenstände, Geräte, Abläufe, Systeme etc. Es ist Teil fachlicher Systematiken und daher sachlogisch-hierarchisch strukturiert und ist die gegenständliche Voraussetzung für ein eigenständiges, selbstreguliertes Handeln“ (Tenberg et al., 2019, S. 107).
- Prozesswissen ist ein „anwendungs- und umsetzungsabhängiges Wissen über berufliche Handlungssequenzen. Prozesse können auf drei verschiedenen Ebenen stattfinden, daher hat Prozesswissen entweder eine Produktdimension (Handhabung von Werkzeug, Material etc.), eine Aufgabendimension (Aufgaben-Typus, -Abfolgen etc.) oder eine Organisationsdimension (Geschäftsprozesse, Kreisläufe etc.). Prozesswissen ist immer Teil handlungsbezogener Systematiken und daher prozesslogisch-multizyklisch strukturiert, wird

durch zielgerichtetes und feedbackgesteuertes Tun erworben und ist damit eine funktionale Voraussetzung für ein eigenständiges, selbstreguliertes Handeln“ (ebd., S. 107 f.).

- Prozesswissen ist ein „anwendungs- und umsetzungsunabhängiges Wissen, welches hinter dem zugeordneten Sach- und Prozesswissen steht. Als Reflexionswissen bildet es die theoretische Basis für das vorgeordnete Sach- und Prozesswissen und steht damit diesen gegenüber auf eine Metaebene. Mit dem Reflexionswissen steht und fällt der Anspruch einer Kompetenz (und deren Erwerb). Seine Bestimmung erfolgt im Hinblick auf:
 - a) das unmittelbare Verständnis des Sach- und Prozesswissens (Erklärungsfunktion),
 - b) die breitere wissenschaftliche Abstützung des Sach- und Prozesswissens (Fundierungsfunktion),
 - c) die Relativierung des Sach- und Prozesswissens im Hinblick auf dessen berufliche Flexibilisierung und Dynamisierung (Transferfunktion)“ (ebd., S. 108).

Entlang dieser Quintessenz lassen sich fachlich-methodische Kompetenzen über Handlung und deren zugrundeliegendem Wissen in Form einer Kompetenzmatrix (Tabelle 1) explizieren. Hierbei werden konkreten beruflichen Handlungen (Spalte 1) jeweils das korrespondierende Wissen (Spalte 2 bis 4), also Sach-, Prozess- und Reflexionswissen, zugeordnet (Tenberg et al., 2020, S. 50). Diese wissenschaftlich fundierte, tabellarische Darstellung findet aktuell insbesondere im technikdidaktischen Lehr-Lern-Kontext zur Explikation von Teilkompetenzen als Lernziele Anwendung (ebd.; Pittich, 2023).

Tabelle 1: Kompetenzmatrix fachlich-methodischer Kompetenzen (vgl. Tabelle 7 in Tenberg et al., 2020, S. 50)

Berufliche Handlung	Korrespondierendes Wissen		
	Sachwissen	Prozesswissen	Reflexionswissen
...			
...			

Wie aus der fallspezifischen Integration (Abbildung 6) hervorgeht, sind für Facharbeiter alle Kompetenzklassen relevant. „Am Anfang sind fachliche und methodische Kompetenzen hoch relevant. Ohne ihre Entwicklung ist deren Weiterführung und Ausweitung in komplexere Kompetenzgefüge nicht vorstellbar“ (Tenberg et al., 2019, S. 99). Berufsbezogen stellen daher fachlich-methodische Kompetenzen den Kern weiterer Kompetenzdimensionen dar.

2.1.1.5 Sozial-kommunikative Kompetenzen

„Sozial-kommunikative Kompetenzen: Dispositionen, kommunikativ und kooperativ selbstorganisiert zu handeln, d. h. sich mit anderen kreativ auseinander- und zusammensetzen, sich gruppen- und beziehungsorientiert zu verhalten, und neue Pläne, Aufgaben und Ziele zu entwickeln“ (Erpenbeck & Rosenstiel, 2007, S. XXIII).

Sozial-kommunikative Kompetenzen, wie in der Definition von Erpenbeck und Rosenstiel beschrieben, fokussieren zwischenmenschliche Dispositionen, um in verschiedenen sozialen Situationen angemessen zu agieren, zu kooperieren und zu kommunizieren, und sind für die Interaktion in beruflichen und sozialen Kontexten essenziell. Im technikdidaktischen Ansatz werden sozial-kommunikative und personale Kompetenzen als überfachliche Kompetenzen zusammengefasst (Tenberg et al., 2020, S. 135 f.). Zur Explikation – wie zuvor bei den fachlich-methodischen Kompetenzen – wird ebenfalls eine Kompetenzmatrix (Tabelle 2) verwendet. „Für die überfachlichen Kompetenzen genügen zwei Spalten, eine für die jeweilige Performanz [berufliche Handlung], eine für das dazu relevante Bezugswissen“ (ebd., S. 56).

Tabelle 2: Kompetenzmatrix überfachlicher Kompetenzen (vgl. Tabelle 9 in Tenberg et al., 2020, S. 56)

Performanz	Bezugswissen
...	...
...	...

Aktuelle Arbeiten (u. a. Pittich et al., 2023; Sing, 2022) konkretisieren für den berufsschulischen Kontext sogenannte ÜFA-Matrizen und explizieren hierbei die Kompetenzbereiche informieren, lernen, kommunizieren, kooperieren, organisieren und digitale Mediennutzung. Die fundierte Konkretisierung dieser Kompetenzen stellt sich jedoch nach wie vor in der praktischen, aber auch in der technikdidaktischen Forschung und Umsetzung als Herausforderung dar und weist Weiterentwicklungspotenziale des technikdidaktischen Kompetenzmodells bzw. Forschungsdesiderate auf (u. a. thematisiert in Zollner, 2025). Möglicher Grund hierfür ist eine Vielzahl an Theorien mit diversen Unschärfen, welche versuchen, verschiedene bzw. unterschiedliche Aspekte und Merkmale zu berücksichtigen (ebd.). Dies ist aufgrund unterschiedlicher Verständnisse zu menschlicher Interaktion, sozialer Wahrnehmung, Kommunikation, Konflikt- und Kritikmanagement, Teamarbeit sowie Führung als auch weiterer diverser individueller Faktoren (siehe personale Kompetenzen) etc. durchaus nachvollziehbar.

Für professionelles Handeln – wie in Abbildung 6 dargestellt – ist diese Kompetenzdimension jedoch ebenfalls von Bedeutung. Nicht zuletzt, da angesichts der voranschreitenden Digitalisierung operative Tätigkeiten durch informationsbezogene, planerische, kommunikative und organisatorische Anteile transformiert bzw. auch ersetzt werden (Pittich et al., 2019). Befunde, die sich prognostisch mit der Facharbeit im Zuge der Digitalisierung auseinandersetzen, zeigen eine Anreicherung der Tätigkeiten mit überfachlichen Kompetenzen, eine Erweiterung durch Wissensarbeit und eine zunehmende Prozessorientierung (Pittich et al., 2019, S. 175).

2.1.2 Wissensarbeit und Informationsverarbeitung

Im Folgenden werden zunächst der Begriff „Wissensarbeit“ definiert, sowie Merkmale von Wissensarbeit charakterisiert (Abschnitt 2.1.2.1). Daran anschließend werden der Zusammenhang von Wissen und Informationen (Abschnitt 2.1.2.2) vertieft sowie ein Modell zur Be- und Verarbeitung von Wissensobjekten (Abschnitt 2.1.2.3) aufgezeigt.

2.1.2.1 Wissensarbeit

Im Kontext des festzustellenden Wandels haben sich sowohl national als auch international eine Vielzahl an Definitionen¹ zu Wissensarbeit und damit verbunden „dem Wissensarbeitenden“ gebildet. Im Kern charakterisiert sich Wissensarbeit dabei als immaterielle, geistig-kognitive Tätigkeit. Im deutschsprachigen Raum ist die Studie von Hube (2005) zum Thema „Beitrag zur Beschreibung und Analyse von Wissensarbeit“ hervorzuheben, da diese ein System zur Beschreibung von Wissensarbeit in Struktur und Prozess entwickelt, eine Methodik zur Analyse und Beurteilung von Wissensarbeit herleitet und nur einer von wenigen Ansätzen ist, die sich explizit mit dem Begriff der Wissensarbeit auseinandersetzt (Hube, 2005, S. 31). Hube definiert Wissensarbeit als

„... geistig objektivierende Tätigkeiten, die neuartige und komplexe Arbeitsprozesse und -ergebnisse betreffen, die äußere Mittel zur Steuerung der Komplexität und ein zweifaches Handlungsfeld benötigen“ (Hube, 2005, S. 61).

Der Ansatz von Hube nimmt dabei Bezug auf die Vorarbeiten von Resch (1988) und Pfiffner und Stadelmann (1995) und greift hierbei die 1) Begrifflichkeiten sowie 2) Verständnisse der Handlungsfelder auf und adaptiert für die Abgrenzung von Wissensarbeit zu Nichtwissensarbeit die 3) Dimensionen Neuartigkeit und Komplexität der Arbeit (ebd.).

1) Resch konstatiert in seinem Ansatz, dass eine Abgrenzung von geistiger und körperlicher Arbeit in der arbeitsteiligen Produktion gegenüber der integrativen Produktion vorherrscht (Abbildung 8). Die Arbeiten sind dabei jeweils von Hand- und Kopfarbeit geprägt. Das bedeutet, dass es keine reine Handarbeit oder Kopfarbeit gibt, sondern immer Mischformen mit unterschiedlichen Ausprägungen vorhanden sind (Hube, 2005, S. 31 sowie Resch, 1988, S. 15). Innerhalb der geistigen Arbeit begründet Resch, dass deren Ergebnisse kein fertiges Produkt sind, sondern für nachfolgende Tätigkeiten verwendet werden (Resch, 1988, S. 20) und diese „Arbeit für andere in Form von Planung, Verwaltung und Kontrolle“ ist (Hube, 2005, S. 32). Beispielsweise wäre ein Architekt in der Planung eines Hauses den geistigen Arbeiten zuzuordnen. Dabei sind die Entwicklung und Konstruktion des Hauses den Kopfarbeiten und die konkrete CAD-Zeichnung des Planes den Handarbeiten zuzuweisen. Der Plan allein stellt jedoch nach Resch kein fertiges Produkt dar, denn erst wenn die Bauarbeiter – körperliche Arbeit – den Plan lesen (Kopfarbeit) und diesen umsetzen (Handarbeit), entsteht dieses.

¹ Helmut Willke (2001); Stefan Meinsen (2003); Manfred Kofranek (2010); Thorsten Hübschen (2015) Zusammenfassung der Definitionen unter: <https://wissensarbeiter.org/definitionen/> [zuletzt abgerufen am 30.08.2023]

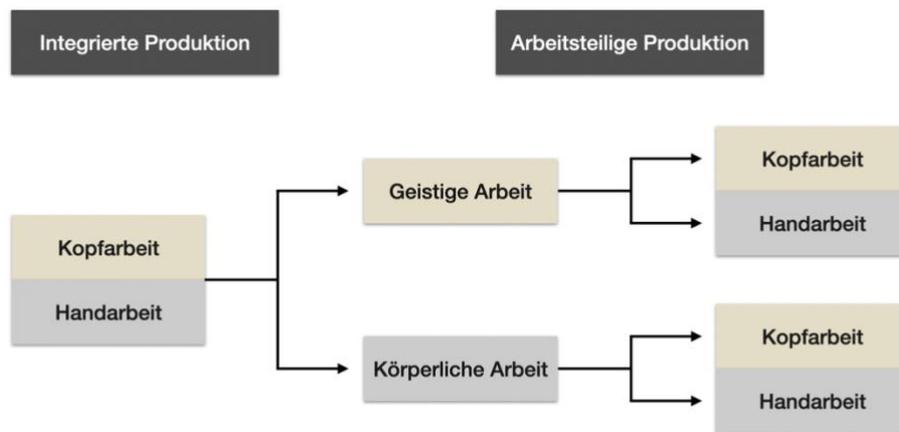


Abbildung 8: Unterscheidung von geistiger Arbeit und körperlicher Arbeit und jeweiligem Anteil an Kopfarbeit und Handarbeit (vgl. Bild 3.3 in Hube, 2005, S. 32 sowie in Anlehnung an Resch, 1988, S. 17)

Pfiffner und Stadelmann greifen die Überlegungen von Resch auf und ergänzen in ihrem Ansatz die Begrifflichkeit des Bezugsproblems (Pfiffner & Stadelmann, 1995, S. 108). Körperliche Arbeit führt mit deren praktischer Umsetzung zu einer tatsächlichen Veränderung im Bezugsproblem. Die geistige Arbeit hingegen analysiert das Bezugsproblem und versucht, dieses zu verstehen, ohne unmittelbare physische Veränderungen herbeizuführen (Hube, 2005, S. 36). Die Resultate der geistigen Arbeit stellen sozusagen Zwischenschritte dar, die wiederum weitere Tätigkeiten erfordern (einschließlich körperlicher Arbeit), um tatsächliche Veränderungen im Bezugsproblem herbeizuführen.

2) Wie bereits aus der Definition von Hube hervorgeht, benötigen die Tätigkeiten der Wissensarbeit ein zweifaches Handlungsfeld. Hierbei wird auf die Handlungsregulationstheorie von Hacker sowie auf Grundzüge des VERA-Verfahrens (Verfahren zur Ermittlung von Regulationserfordernissen in der Arbeitstätigkeit) zurückgegriffen. In einem faktischen Handlungsfeld wird tatsächlich gearbeitet – in einem Referenzhandlungsfeld wird nicht tatsächlich gearbeitet, sondern Handlungen am Bezugsproblem antizipiert, um die zukünftigen Handlungsmöglichkeiten des geistig Arbeitenden zu definieren (Hube, 2005, S. 60).

Resch präsentiert hierzu ein Beispiel: „Unterstellt sei ein Arbeitender, der ein Produkt, z. B. einen Holzstuhl selbst entwirft und herstellt. Im Prinzip wird er dabei so vorgehen: Zunächst vergegenwärtigt er sich das ihm offen stehende Handlungsfeld, d. h. er überlegt sich, welche Handlungsmöglichkeiten [Referenzhandlungsfeld] er hat. Bevor der Arbeitende mit den äußeren Aktivitäten beginnt, wird er durch inneres Handeln (Probearbeiten) eine Zielvorstellung entwickeln und einen ungefähren Handlungsweg festlegen. Erst nach diesem probearbeiten innerhalb des intern repräsentierten Handlungsfeldes wird der Arbeitende reale Handlungen im Handlungsfeld [faktisches Handlungsfeld] ausführen“ (Resch, 1988, S. 48). Hube stellt zur Analyse und Beurteilung fest, dass das faktische Handlungsfeld Instrumente zur Handhabung der Komplexität des Arbeitsprozesses benötigt, welches einerseits eine Orientierung im Referenzhandlungsfeld gibt sowie andererseits das Referenzergebnis auf das Bezugsergebnis überträgt (Hube, 2005, S. 63).

3) Im Ansatz nach Hube werden die Dimensionen Neuartigkeit und Komplexität der Arbeit zur Abgrenzung von Wissensarbeit zu Nichtwissensarbeit betrachtet. Bereits Pfiffner und Stadelmann (1995) setzten hierzu am Komplexitätsgrad der Arbeitsprozesse bzw. des -resultats als ‚Schlüsselgröße‘ in der Wissensgesellschaft an und konkretisieren den Zusammenhang mit dem Arbeitstyp in einer Matrix (Tabelle 3). Die Differenzierung des Komplexitätsgrades wird über die Einwirkung auf das Bezugsproblem bzw. Handlungsfeld festgelegt, welches zur Zuordnung von Nichtwissensarbeit oder Wissensarbeit führt. Die Arbeitstypen werden in „geistig objektivierend“ und „körperlich realisierend“ unterteilt.

Tabelle 3: Definitionsmatrix zur Untersuchung von Wissens- und Nichtwissensarbeit nach Pfiffner und Stadelmann (1995)

Komplexitätsgrad der Arbeitsprozesse bzw. des -resultats	Arbeitstyp		
	Geistig objektivierend	Körperlich realisierend	Zuordnung
tief	Unmittelbare Einwirkung am Bezugsproblem möglich (faktisches Handlungsfeld = Bezugsproblem)		Nicht-wissensarbeit
	Sekretärin beim Tippen, Auszahlung des Bankschalterbeamten	Bäcker beim Backen, Schumacher beim Ledernähen	
hoch	Nur mittelbare Einwirkung am Bezugsproblem möglich, damit äußere Mittel und ein zweites Handlungsfeld, Referenzhandlungsfeld, notwendig		Wissensarbeit
	Experimentalforschung, Entscheidung der strategischen Unternehmensführung	Schwieriger chirurgischer Eingriff, Linien-Pilot	

Ausschlaggebend hierbei sind die Einwirkungen am Bezugsproblem, welche bei Nichtwissensarbeit unmittelbar erfolgen – das faktische Handlungsfeld ist somit das Bezugsproblem – und im Fall der Wissensarbeit nur mittelbare Einwirkungen am Bezugsproblem möglich sind. Es sind äußere Mittel und ein zweites Handlungsfeld – das Referenzhandlungsfeld – notwendig. „Zu den äußeren Mitteln zählen dabei Instrumente und Werkzeuge, Symbole und Verhaltensweisen, die eine Bewältigung der Komplexität ermöglichen. Werkzeuge, die bei einfachen Arbeitsvorgängen verwendet werden, sind demnach nicht als äußere Mittel definiert, da sie nicht primär dem Komplexitätsmanagement dienen. Sobald eine der Teiltätigkeiten des Arbeitsprozesses so komplex ist, dass der Einsatz äußerer Mittel notwendig wird, ist der gesamte Arbeitsvorgang komplex“ (Hube, 2005, S. 37). Aus der Matrix geht zudem hervor, dass sowohl „körperlich realisierende“ als auch „geistig objektivierende“ Arbeitstypen mit hoher Komplexität im Arbeitsprozess bzw. -resultat Wissensarbeit enthalten können. Exemplarisch werden hierbei ein schwieriger chirurgischer Eingriff und der Linienpilot sowie die Experimentalforschung und die

Entscheidungen der strategischen Unternehmensführung genannt (Pffifner & Stadelmann, 1995, S. 112).

Zur Adaption der Neuartigkeit greift Hube u. a. auf Grundzüge von Hermann (2002) zurück, welche Wissensarbeit beschreibt als „die Bewältigung von Aufgaben, die zumindest für die betreffende Person so komplex oder neuartig sind, dass ihre Erfahrungen nicht ausreichen, um zu dem erwünschten Ergebnis zu kommen, sodass es für sie notwendig wird, neues Wissen zu erwerben, zu integrieren oder zu entwickeln“ (Hermann, 2002, S. 11). Hube legt fest, dass für geistig-objektivierende Arbeitstypen, die keine Neuartigkeit der Aufgabe aufweisen, auch keine Wissensarbeit vorliegt (Hube, 2005, S. 62 f.). Zur Beschreibung der Arten von Wissensarbeit wird eine Vierfeldertafel (Abbildung 9) aufgespannt, welche die Neuartigkeit der Arbeit der Komplexität der Arbeit gegenüberstellt. (ebd., S. 64). „Neben der Abgrenzung zwischen Wissensarbeit und Nichtwissensarbeit kann außerdem zwischen der Wissensarbeit in Einzelfällen und Wissensarbeit als Profession unterschieden werden. Diese Unterscheidung ist notwendig, um Arbeitspersonen, die nur in Einzelfällen mit neuartigen Aufgaben konfrontiert werden, von den Wissensarbeitern zu unterscheiden, die permanent mit neuartigen Aufgabenstellungen konfrontiert sind und aufgrund der Ausprägung der weiteren Komplexitätsmerkmale originär Wissensarbeit leisten“ (ebd., S. 63 f.).

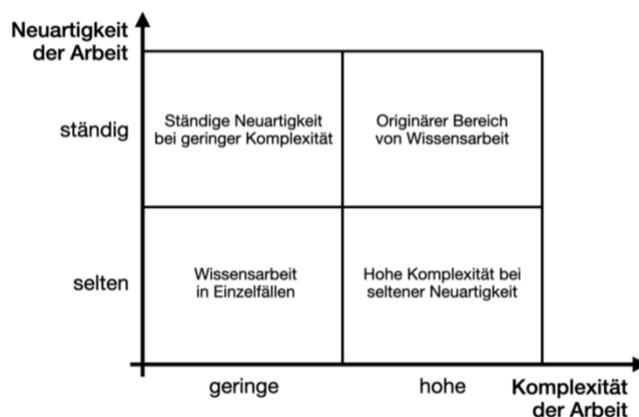


Abbildung 9: Vierfeldertafel zur Beschreibung verschiedener Arten von Wissensarbeit (vgl. Bild 4.7 in Hube, 2005, S. 64)

„Die Dimensionen Neuartigkeit und Komplexität der Arbeit werden wie folgt konkretisiert:

- Neuartigkeit besteht dann, wenn die auszuführende Arbeitsaufgabe für die ausführende Arbeitsperson neuartig ist und nicht auf diesbezügliches eigenes Erfahrungswissen zurückgegriffen werden kann. Wichtig für diese Definition von Wissensarbeit ist dabei die Überlegung, dass die Entscheidung, ob es sich um Wissensarbeit handelt erst durch die individuelle Wahrnehmung der Arbeitsaufgabe durch die Arbeitsperson entsteht. Für eine erfahrene Person mit dem entsprechenden Fach- und Verfahrenswissen kann eine Aufgabe mit einem bestimmten Komplexitätsgrad noch keine Wissensarbeit darstellen, während dieselbe Aufgabe für eine andere Person ohne die entsprechende Erfahrung bereits Wissensarbeit darstellt.

- Um die Komplexität von Wissensarbeit zu beschreiben wird auf die grundlegenden Erkenntnisse von Theorie und Praxis des ganzheitlichen Problemlösens komplexer Probleme zurückgegriffen. Komplexe Probleme sind durch eine Vielzahl von Einflussfaktoren gekennzeichnet, die untereinander durch ein dynamisches Verknüpfungs- und Interaktionsmuster stark verknüpft sind. Der große Unterschied zu weniger komplexen Problemen besteht in der Dynamik, wodurch Einflussfaktoren sich verändern oder wegfallen können oder Art und Intensität der Beziehungen zwischen den Einflussfaktoren stark variieren. Für die Lösung solcher komplexer Probleme gelten die drei folgenden grundlegenden Überlegungen (Gomez/Probst, 1999, S. 22 ff.):
 - Die Problemlösung ist eine Führungsaufgabe und kann nicht delegiert werden,
 - komplexe Probleme können nur in Teamarbeit erfolgreich bearbeitet werden,
 - die Bewältigung komplexer Probleme ist ein Lernprozess“ (Hube, 2005, S. 62 f.).

Hube ergänzt hierzu, dass die Komplexität von Wissensarbeit einen hohen Kommunikations- und Kooperationsaufwand mit anderen beteiligten Personen und Gruppen, einen Lern- und Weiterbildungsbedarf, also ein permanentes Lernen für die Bewältigung der Arbeitsanforderungen, erfordert sowie eine Dynamik durch unerwartete Situationen und ungeplante weitere Ad-hoc-Aufgaben mit hohem Zeitdruck mit sich bringt (ebd., S. 62 ff.).

Demnach ist Wissensarbeit häufig in neuartigen und komplexen Arbeitsprozessen und -ergebnissen enthalten. Hube betont in diesem Kontext, dass es in modernen Arbeitsprozessen zu einer verstärkten Nutzung von Informationen und Wissen kommt und „Informationen und Wissen [...] zu einer entscheidenden Determinante menschlicher Arbeit geworden [sind]“ (ebd., S. 18 ff.). Der Wissensarbeitende steht also vor der Herausforderung, das für ihn relevante Wissen und damit verbundene Informationen möglichst effizient herauszufiltern und weiter zu verwenden (ebd., S. 27; Pittich et al., 2019, S. 173).

2.1.2.2 Wissen und Informationen

Im Kontext dieser Arbeiten formuliert Hube (mit Verweis auf Anlehnung an Cleveland 1989, S. 29 ff.) charakteristische Merkmale von Wissen (Hube, 2005, S. 26 ff.):

- Wissen ist an seinen Träger gebunden und wird ebenso wie Informationen und Daten erst durch deren Darstellung repräsentiert.
- Wissen und Informationen steigen gleich mit deren Nutzung an, da Wissen durch gewonnene Erfahrungen zunimmt und nicht verbraucht wird. Folge dieser Vermehrung und Ausdehnung ist eine sogenannte ‚Informationsflut‘, die durch weltweite Verfügbarkeit und einfache Transportierbarkeit sowie durch das Internet verstärkt wird. Folglich sind Informationssuchende ‚quantitativ über- und qualitativ unterinformiert‘ (Weidt, 2003, S. 44).

- Wissen ist zeit- und raumunabhängig, da es mittels aktueller Informations- und Kommunikationstechnologien möglich ist, Wissen und Informationen an nahezu jedem Ort zu bekommen.

Für die Beschreibung des Zusammenhangs von Wissen und Informationen wird häufig – u. a. auch von Hube – das prominente Modell der Wissenspyramide aus dem Bereich des Informationsmanagements und der Wissensverarbeitung verwendet. Die Wissenspyramide (Abbildung 10) – auch in angelehnter Form als DIW-Modell bekannt – ist eine hierarchische Darstellung der Stufen Zeichen, Daten, Informationen und Wissen (u. a. North, 1999; Rehäuser & Krcmar, 1996). Das Modell beschreibt, dass aus der Strukturierung bedeutungsloser Zeichen Daten entstehen. Diese Daten werden durch die Interpretation und die Zuweisung einer Bedeutung einer Person zu Informationen. Wissen folgt durch die Verknüpfung und Anwendung der Informationen in einem bestimmten Kontext.

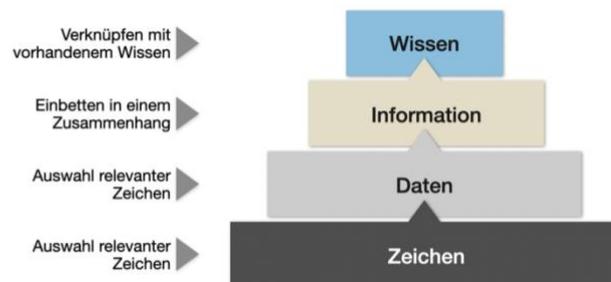


Abbildung 10: Zeichen, Daten, Informationen und Wissen in einer hierarchischen Darstellung (vgl. Rehäuser & Krcmar, 1996, S. 3)

Hube kritisiert hierbei, dass „eine scharfe Trennung zwischen diesen Begrifflichkeiten, insbesondere zwischen Information und Wissen [...] nicht unbedingt hilfreich zu sein [scheint]“ (Hube, 2005, S. 25) und belässt dies davon ausgehend bei dem „Kontinuum zwischen den Polen Daten und Wissen“ nach Probst et al. (1999, S. 38) mit dessen Merkmalen (Abbildung 11).

Daten	Information	Wissen
unstrukturiert	strukturiert
isoliert	verankert
kontext-unabhängig	kontext-abhängig
geringe Verhaltenssteuerung	hohe Verhaltenssteuerung
Zeichen	kognitive Handlungsmuster

Abbildung 11: Kontinuum zwischen den Polen Daten und Wissen (vgl. Probst et al., 1999, S. 38)

Mit der Fokussierung des Informationsbegriffes und des Informationsverständnisses zeigen sich aktuell vielfältige Ausprägungen innerhalb unterschiedlicher Disziplinen. Neueste Literatur mit wissenschaftlich fundierten Beiträgen zum Thema Informationen liefern Kuhlen et al. (2023) mit der siebten Ausgabe zum Thema „Grundlagen der Informationswissenschaft“. Bei der Beschreibung des Begriffs „Information“ beziehen sich Kuhlen und Semar in ihrem Beitrag auf eine eher personen- und anwendungsbezogene Perspektive: „Was Information ist, was also

Nutzer oder Nutzerinnen in Situationen informationeller Unsicherheit oder Unterbestimmtheit tatsächlich aus der auf sie einströmenden oder ihnen zur Verfügung gestellten Informationsangebote verwenden, was also zu Information wird, entscheiden letztlich sie – wobei das sicherlich nicht immer autonome Entscheidungen sind, dafür sind die darauf wirkenden externen Kontextfaktoren zu groß“ (Kuhlen & Semar, 2023, S. 3). Davon ausgehend wird eine analytische Begriffsdifferenzierung zwischen „Information-P“ und „Information-N“ durchgeführt. Information-P ist der Prozess der Informationserstellung, mit dem Ergebnis von sozusagen potenzieller Information. Information-N ist die Nutzung mit dem Ergebnis einer tatsächlichen Handlung (ebd., S. 12). Entlang dieser Setzung erstellen Sie ein Modell zur Be- und Verarbeitung von Wissensobjekten.

2.1.2.3 Modell zur Be- und Verarbeitung von Wissensobjekten

Im Kontext der Informationswissenschaft arbeiten Kuhlen und Semar (2023) ein objektbezogenes und verfahrens-/prozessorientiertes Modell zur Be- und Verarbeitung von Wissensobjekten (Abbildung 12) aus. Dabei wird der Prozess der Informationserstellung in erster Linie auf die informationelle Be- und Verarbeitung von Wissensobjekten bezogen (Kuhlen & Semar, 2023, S. 12).

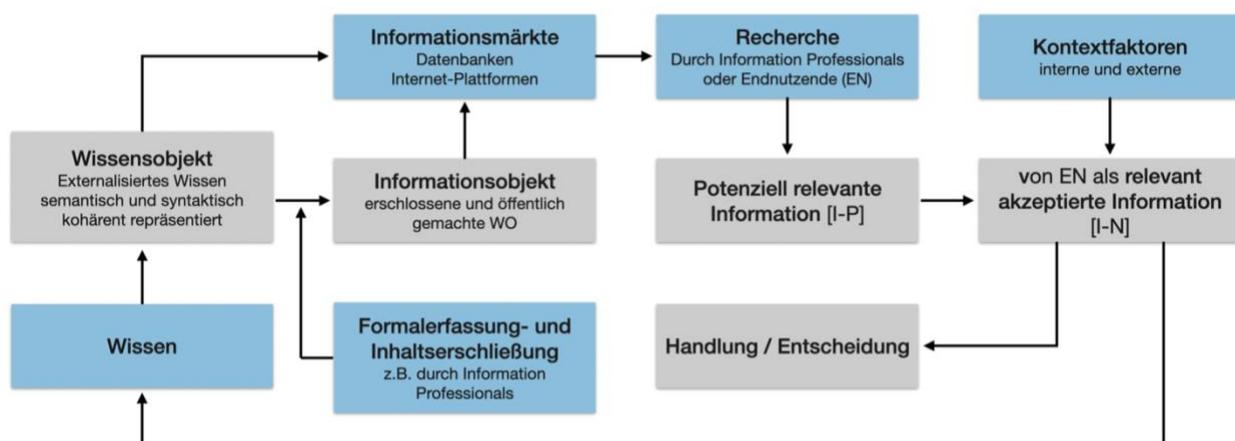


Abbildung 12: Von den Wissensobjekten zur handlungsrelevanten Information (vgl. Abbildung 1 in Kuhlen & Semar, 2023, S. 12)

Wissensobjekte sind Objekte, die in ihrer medialen oder auch textuellen Form noch nicht der Öffentlichkeit zugänglich gemacht – also publiziert – worden sind (ebd., S. 12). Werden diese Wissensobjekte veröffentlicht, werden die Wissensobjekte zu Informationsobjekten, welche auf Informationsmärkten (bspw. Datenbanken, Verlagen, Internetwelt, Content-Provider-Organisationen u. v. m.) zu finden sind. „Informationssysteme bieten über ihre so entstandenen Informationsobjekte Information an, i. d. R. nicht gezielt für einzelne Personen, sondern sozusagen auf Verdacht für die auf das jeweilige Informationssystem passende Zielgruppe“ (ebd., S. 13). Informationsmärkte bieten demnach Informations- und Wissensobjekte an, welche über Methoden und Verfahren zur Inhalts- bzw. Informationsgenerierung (Recherche) erschlossen werden können. „Diese Information-P ist potenzielle Information, welche bei späteren konkreten

Nutzungen als reale Information-N verwendet werden kann“ (ebd., S. 13). Bezüglich der Information-N gehen Kuhlen und Semar (2023) zudem auf den Informationsnutzenden ein und beschreiben die Informationstätigkeit nach Wersig (1971) als „Beseitigung oder Verringerung [Reduktion] von Unkenntnis (oder genauer der Unwissenheit)“ (Wersig, 1971, S. 162 sowie Kuhlen & Semar, 2023, S. 13 f.). Die Verwendung von Informationen geschieht dabei unter Berücksichtigung zahlreicher individueller, institutioneller und organisationaler Kontextfaktoren, die auf konkrete Handlungssituationen bezogen sind. Dies führt zu Handlungen bzw. Entscheidungen oder Wissen, welches für die Generierung neuer Wissensobjekte verwendet wird (Kuhlen & Semar, 2023, S. 13 f.). Durch diesen Kreislauf entsteht im Modell eine Verfahrens-/Prozessorientierung.

Zusammenfassend lassen sich in Anbetracht des technisch-produktiven Wandels im Zuge der Digitalisierung in aktuellen technologischen Innovationen eine Anreicherung beruflicher Tätigkeiten mit überfachlichen Kompetenzen, eine Erweiterung durch Wissensarbeit und eine zunehmende Prozessorientierung feststellen (Pittich et al., 2019, S. 175). Durch die Neuartigkeit und Komplexität der Arbeit ergeben sich zusätzliche Herausforderungen, die es in unerwarteten Situationen und bei ungeplanten weiteren Arbeitsaufgaben zu bewältigen gilt. Dadurch werden Strategien der Informationsverarbeitung erforderlich. Diese Facette zeigt sich u. a. auch in der zunehmenden Prozessorientierung, welche mit komplexen Analysen und Fehler- und Schwachstellenbeseitigung zusammenhängt (ebd., S. 176). Dabei wird die Informationsverarbeitung dann relevant, wenn das bisherige Erfahrungs- und Verfahrenswissen bei Problemlösungen nicht mehr ausreicht und eine Sicherung der operativen Handlungsfähigkeit nötig wird. „Die Verifizierung von Informationen und das Beherrschen der manuellen Tätigkeiten liegt nach wie vor bei den Facharbeiter:innen. Eine Problemlösung wird nur zum Erfolg führen, wenn sie unmittelbar, professionell und sicher mit entsprechenden technischen Systemen und Anlagen umgesetzt wird“ (ebd., S. 173).

2.1.3 Kompetenzdiagnostik

Mit der Zielperspektive der Forschungsarbeit, Kompetenzanforderungen in der Additiven Fertigung im Bauwesen zu erschließen, ist neben einem schlüssigen, handhabbaren Konzept zu Kompetenzen eine entsprechend konsistente Diagnostik notwendig. Mit dem grundlegenden Verständnis von Kompetenzen des technikdidaktischen Ansatzes (Abschnitt 2.1.1) als Verbindung von beruflichen Handlungen und dessen kompetenzrelevantem Wissen eröffnen sich zwei mögliche Herangehensweisen. Die normativ angelegte, materialanalytische Herangehensweise 1 erschließt zunächst das gesamte kompetenzrelevante Wissen (u. a. auch in der Forschungsbilanzierung, Kapitel 1.2 thematisiert) und schließt dann auf berufliche Handlungen. Hierzu erfolgen qualitativ inhaltliche (Material-)Analysen und Strukturierungen, welche in berufliche Handlungen münden – nach der Idee: „So soll es gemacht werden“. Die praxisnahe Herangehensweise 2 fokussiert die konkret ablaufenden beruflichen Handlungen. Das bedeutet, dass ausgehend von Prozessbeobachtungen und -analysen konkret ablaufende berufliche Handlungen identifiziert werden und das hierfür benötigte, kompetenzrelevante Wissen diagnostiziert bzw. expliziert wird. Beide Herangehensweisen haben Vor- und Nachteile. Ein Vorteil von Herangehensweise 1 ist, dass diese Analysen mit überschaubarem Aufwand und den verfügbaren Informationen sowie Unterlagen durchgeführt werden können. Entscheidender Nachteil ist jedoch, dass durch dieses Vorgehen ‚fiktive‘ berufliche Handlungen generiert werden können, welche nicht oder nur teilweise mit den tatsächlichen Abläufen übereinstimmen. Der Vorteil von Herangehensweise 2 ist, dass dieser eben beschriebene Effekt der Generierung von ‚fiktiven‘ beruflichen Handlungen umgangen wird, da hier der tatsächlich ablaufende Prozess mit den konkreten Handhabungen und Tätigkeiten im Zentrum steht. Nachteil davon ist, dass diese Bestandsaufnahmen, Analysen und Diagnosen mit einem hohen Aufwand verbunden sind. Gleich bleibt, dass beide Herangehensweisen mit den Herausforderungen der darzustellenden Komplexität und deren Zusammenhängen sowie mit einer stetigen Weiterentwicklung der Prozesse und dadurch mit einer gewissen Flexibilität und Agilität konfrontiert sind.

Dem technikdidaktischen Ansatz liegt eine sogenannte ‚handlungsbezogene Wissensdiagnostik‘ zugrunde, welche mit Herangehensweise 2 konform geht. Ausgangspunkt einer handlungsbezogenen Wissensdiagnostik sind, wie der Name bereits andeutet, die tatsächlich ablaufenden beruflichen Handlungen. Die zentrale Herausforderung der Erhebung zu diesem Diagnoseverfahren besteht darin, dass der Arbeitsvorgang in vollem Umfang und ausreichender Komplexität erfasst werden muss, um entsprechende kompetenzrelevante Wissensaspekte diagnostizieren zu können. Wie die Studie nach Pittich (2008) zeigt, ist hierzu ein rein prozessdiagnostischer Zugang entlang von Beobachtungen nur eingeschränkt möglich, da hier der Zusammenhang von Wissen und Handeln nicht ausreichend abgegriffen wird und die relevanten, komplexen Handlungen aufgrund der Länge und Vielschichtigkeit nur bedingt direkt und komplett beobachtet werden können (Pittich, 2013, S. 84). Dem gegenüber haben sich retrospektive Erhebungsmethoden und Zugänge als geeignet erwiesen (Rausch, 2012, S. 252). Retrospektive bedeutet hier ein ‚Rückblicken‘ auf bereits geschehene Ereignisse. Dieses

Vorgehen wird unter anderem von Gutachtenden bei der Schadensregulierung angewendet. Hierbei werden anhand von Schäden die schadensträchtigen Handlungen und Prozesse identifiziert sowie mögliche Ursachen rekonstruiert (Rapp et al., 2011). Diese Bezüge greift Pittich (2013) im Rekonstruktionsansatz auf, um handlungsdeterminierende Dispositionen in Form von Wissen zu erheben. Die analytische Handlungsrekonstruktion erfolgt dabei entlang der Schritte „Ursachen“, „Behebung“ und „Vermeidung“ (Pittich, 2013, S. 84). Der hierbei umgesetzte Ansatz (Tabelle 4) über Fachgespräche gliedert sich in vier Abschnitte mit entsprechendem Vorgehen und deren Intentionen (ebd., S. 90 f.).

Tabelle 4: Abschnitte, Vorgehen und Intentionen des Fachgesprächs zum Rekonstruktionsansatz nach Pittich (2013)

Abschnitt		Vorgehen	Intention
1	Einführung	Begrüßung und Besprechung des Ablaufs	Vorbereitung auf das anstehende Fachgespräch
2	Betrachtung	Betrachtung des Fertigungsgegenstandes (mit Schadensbilder)	Zeigen und Analyse des Fertigungsgegenstandes
3	Arbeitsablaufplan	Erstellung eines Fertigungsplans	Sicherstellung einer vertieften Auseinandersetzung mit dem Fertigungsgegenstand
4	Schadens-erörterung	Erörterung der jeweiligen Schäden unter genauerer Betrachtung des Fertigungsgegenstandes	Identifikation der Schadensbilder (Fehlerart) und Begründung zur Fehlerursache, Behebung und Vermeidung

Die Erhebung orientiert sich zentral am Protokoll zum Leitfaden (Pittich, 2013, S. 222), welches über begleitende, auszufüllende Dokumente (ebd., S. 230 f.) ergänzt wird:

- Für Abschnitt 1 werden der im Leitfaden aufgelistete Aufbau des Fachgesprächs herangezogen und relevante personenbezogene Daten dokumentiert.
- Die Dokumentation des Probanden bezüglich der Arbeitsschritte in Abschnitt 3 erfolgt entlang eines Formblattes zum Fertigungsplan (Tabelle 5). Dieser beinhaltet die Arbeitsschritte, Hilfsmittel, Werkzeuge etc. sowie Anmerkungen.

Tabelle 5: Formblatt zum Fertigungsplan des Rekonstruktionsansatzes nach Pittich (2013, S. 230)

Arbeitsschritt	Hilfsmittel, Werkzeuge etc.	Anmerkung

- Weiter werden – einleitend zu Abschnitt 4 – dem Probanden zur genaueren Beobachtung des Fertigungsgegenstandes ein Formblatt für Notizen (Tabelle 6) zur Verfügung gestellt, welches sich in „Art des Fehlers“ und „Anmerkung“ gliedert.

Tabelle 6: Formblatt für Notizen des Rekonstruktionsansatzes nach Pittich (2013, S. 231)

Art des Fehlers	Anmerkung

- Für Abschnitt 4 wird eine im Protokoll enthaltene Checkliste zur jeweiligen Art des Fehlers (Tabelle 7) herangezogen. Hierin werden, neben der Bezeichnung der Fehlerart, über vier Stufen konkrete Kriterien dieser Fehlerart beschrieben. In der Checkliste wird dabei notiert, ob der Proband die Art sowie Kriterien direkt (D) oder über Nachfragen (N) nennt.

Tabelle 7: Checkliste zum Protokoll des Rekonstruktionsansatzes nach Pittich (2013, S. 223)

D / N		Art des Fehlers							
		<i>[Bezeichnung der jeweiligen Fehlerart]</i>							
		<i>[Beschreibung zu Kriterium 1, Beschreibung zu Kriterium 2, Beschreibung zu Kriterium 3, Beschreibung zu Kriterium 4]</i>							
		1	2	3	4				

Zudem wird im Protokoll zur begleitenden Dokumentation der Fehlerursache (Tabelle 8) jeweils eine Tabelle pro Fehlerart verwendet. Diese gliedert sich in die ursächliche Klärung und Begründung, Behebung und Vermeidung.

Tabelle 8: Protokoll zur begleitenden Dokumentation der Fehlerursache des Rekonstruktionsansatzes nach Pittich (2013, S. 229)

Bezeichnung der jeweiligen Fehlerart	
Ursächliche Klärung und Begründung	Behebung
	Vermeidung

Der gesamte Erhebungsprozess über das Fachgespräch entlang der vier Abschnitte wird audiovisuell aufgezeichnet und anschließend über die strukturierende qualitative Inhaltsanalyse nach Mayring (2002 und 2010) ausgewertet (Pittich, 2013, S. 93). „Das hierarchische System der Analysekategorien [Abbildung 13] ist als eine Zusammenführung von theoretischen Wissensarten und fachlichen Inhalten der Sachanalyse zu sehen. Die Kategorien repräsentieren die grundlegenden Einschätzungsdimensionen [...] der skalierend strukturierenden Inhaltsanalyse“

(Pittich, 2013, S. 100). Die hierin genannten Wissensarten beziehen sich auf das Sach- Prozess- und Reflexionswissen² (siehe Kapitel 2.1.1.4).

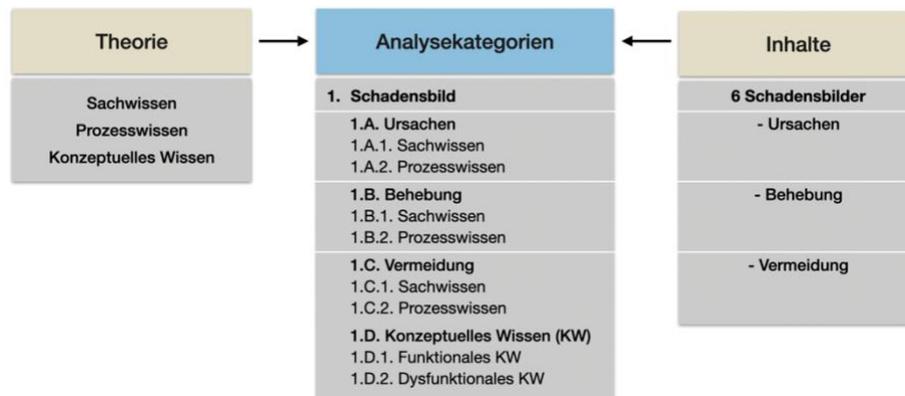


Abbildung 13: Struktur der Analysekatoren (vgl. Abbildung 27 in Pittich, 2013, S. 100)

Davon ausgehend werden die Kodier- und Kontexteinheiten entlang der Wissensarten festgelegt. „[D]ie Kategorie Sachwissen [besteht] aus einzelnen Fachbegriffen (z. B. Fräse) und ist damit wie bereits im Unterabschnitt „Kodiereinheit“ beschrieben, die kürzest mögliche Einheit. Das Prozesswissen wird gemäß der theoretischen Setzung in Produkt- und Aufgabendimension unterschieden. Als Aspekte der Produktdimension werden einfache Prozesse (u. a. die Handhabung von Werkzeugen) kodiert. Diese setzen sich aus Begriffspaaren zusammen (z.B. „Falz gefräst“) und grenzen sich aufgrund der Länge und des Informationsgehalts nach unten vom Sachwissen und nach oben von der Aufgabendimension des Prozesswissens ab. Die Aufgabendimension enthält konform zur Definition [...] Wissen über umfangreiche Handlungssequenzen. Diese gehen über Begriffspaare hinaus, sind jedoch noch immer prozessual orientiert und unterscheiden sich damit von tiefergehenden Begründungen des Konzeptuellen Wissens“ (Pittich, 2013, S. 103). Die aufkommenden Begründungszusammenhänge (Reflexionswissen) werden dabei als Textpassagen kodiert und entlang eines gesonderten Analyseleitfadens ausgewertet (ebd., S. 106 f.). Zu diesem Auswertungsprozess werden „die Inhalte der Sachanalyse um Aspekte des Originalmaterials ergänzt“ (ebd., S. 101). Die Arbeitsschritte aus dem Fertigungsplan können zudem für differenzierte Aussagen zur kognitiven Durchdringung des Fertigungsprozesses sowie für die Verwendung der einschlägigen Fachsprache verwendet werden (ebd., S. 92).

Wie die Ergebnisse der Studie von Pittich (2013) zeigen, erweist sich das Rekonstruktionsverfahren als ein interessanter kompetenzdiagnostischer Zugang, welcher retrospektiv eine Vielzahl möglicher problemorientierter Anforderungssituationen des beruflichen Alltags abbildet (Pittich, 2013, S. 187). „Über diese grundlegende Eignung des Instruments hinaus konnte geklärt

² Das Reflexionswissen wird in Pittich (2013) bei gleichbleibender Bedeutung als konzeptuelles Wissen bezeichnet. Das dysfunktionale konzeptuelle Wissen bezieht sich dabei auf Fehlverständnisse (Pittich, 2013, S. 101)

werden, dass Sach- und Prozesswissen innerhalb der „Ursachen“ einen gleichermaßen bedeutsamen Einfluss auf das Konzeptuelle Wissen haben“ (ebd., S. 162). Dadurch ist der Rekonstruktionsschritt „Ursachen“ durch dessen Verständnisakzentuierung besonders hervorzuheben. „Er korrespondiert zudem direkt mit dem Rekonstruktionsschritt „Vermeidung“, da diese als Schlussfolgerung vergangener schadensträchtiger Handlungen anzusehen ist. Die explizit dargestellte Verbindung von ‚Ursachen‘ und zukünftiger ‚Vermeidung‘ zeigt sich insbesondere bedeutsam, da sich darüber eine Transferrelevanz des Wissens andeutet“ (ebd., S. 186). Der Rekonstruktionsschritt ‚Behebung‘ bezieht sich auf die fachliche Ausbesserung des Schadens und erweist sich als „abgekoppelt“ von den beiden anderen Rekonstruktionsschritten (ebd., S. 186f.). Nichtsdestotrotz stellt der Rekonstruktionsansatz einen validierten und erprobten Ansatz einer beruflichen Kompetenzdiagnostik dar, welcher über eine handlungsrelevante Wissensrekonstruktion umgesetzt wird und die Diagnostik fachlich-methodischer Kompetenzen präzisiert (ebd., S. 187). Die Diagnostik überfachlicher Kompetenzen bleibt aktuell im technikdidaktischen Gesamtansatz jedoch offen.

2.2 Additive Fertigung

Wie bereits aus der Einleitung hervorgeht, erfolgt die Herstellung eines Produktes mit additiver Fertigung (Abbildung 14) durch einen schichtweisen Aufbau, bei dem Material nur dort aufgetragen wird, wo es strukturell oder funktionell erforderlich ist (Kloft et al., 2019, S. 929 f.). Ausgangspunkt der additiven Fertigung ist hierbei immer ein (a) digitales Modell des herzustellenden Produktes. Dieses wird in einem nächsten Schritt virtuell in (b) Schichten mit gleicher Dicke („Slicing“) aufgeteilt und in (c) planare Geometrien aus dem Volumen und der Form der Schichten abgeleitet (Weger et al., 2016, S. 403). Die Einzelschichtinformationen werden daraufhin an die 3D-Fertigungsmaschine übermittelt, welche diese entsprechend von der (1) ersten Schicht bis zur (2) letzten Schicht umsetzt. Abschließend erfolgt bei Bedarf eine (3) Nachbearbeitung des fertig ‚gedruckten‘ Produkts (ebd.).

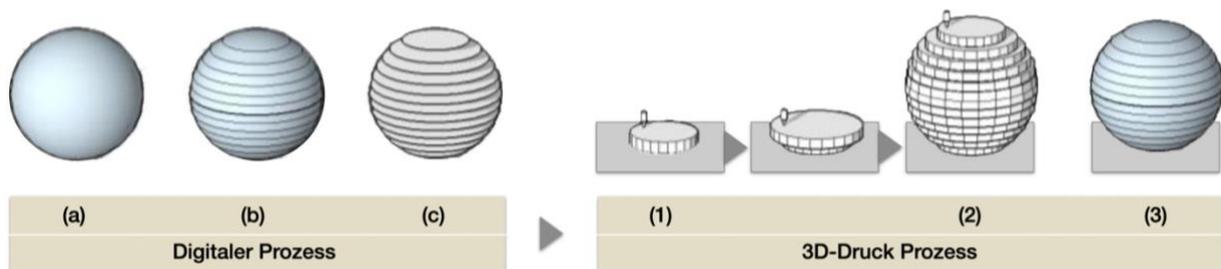


Abbildung 14: Herstellung eines Produktes mit additiver Fertigung (in Anlehnung an Abbildung 1 in Weger et al., 2016, S. 403)

Auch für den Bereich des Bauwesens wird der additiven Fertigung enormes Potenzial zugewiesen, denn additiv gefertigte Bauwerke können mit hoher Gestaltungsfreiheit (äußere Formgebung) sowie Ressourceneffizienz (innerer Strukturaufbau) erstellt werden (Kloft et al., 2019, S. 222 f.; Kloft et al., 2021, S. 929 f.). Die geometrische Machbarkeit, also das potenziell mögliche Design eines Bauteils in Verbindung mit dessen Herstellbarkeit, wird unmittelbar durch das additive Fertigungsverfahren und die dabei verwendeten Materialien vorgegeben (u. a. Henke, 2016). Ausgehend von diesen Gegebenheiten ergeben sich für das Bauwesen spezifische Fertigungsverfahren und -methoden (Kapitel 2.2.1). Der hierin umgesetzte additive Fertigungsprozess – entlang der Logik aus Abbildung 14 – wird dabei bereits allgemein in einem Normentwurf zur Qualitätssicherung (Kapitel 2.2.2) festgehalten.

2.2.1 Fertigungsverfahren und -methoden im Bauwesen

Die Fertigungsmethoden der additiven 3D-Schichttechniken im Bauwesen (Abbildung 15) lassen sich grundlegend in Verfahren mit Partikelbett (Abschnitt 2.2.1.1) und in Verfahren mit Materialablage – Deposition – (Abschnitt 2.2.1.2) aufteilen (Kloft et al., 2021, S. 225). Diese gliedern sich wiederum in die Methoden der ‚Aktivierung‘, ‚Intrusion‘ und ‚Binder Jetting‘ sowie ‚Extrusion‘ und ‚Shotcrete‘.

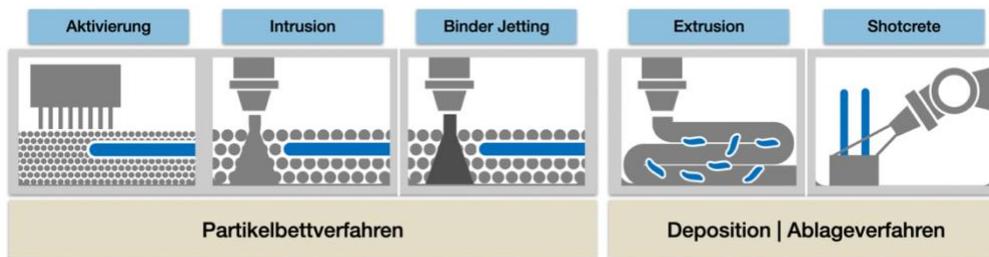


Abbildung 15: Fertigungsmethoden und -verfahren im Bauwesen

2.2.1.1 Partikelbettverfahren

Beim Partikelbettverfahren erfolgt der Materialauftrag – das Aufbringen von Partikeln bzw. der Gesteinskörnung, wie beispielsweise Sandstein, Marmor oder Vulkangestein – zunächst über den gesamten Bauraum, sodass ein Partikelbett entsteht. In diesem werden daraufhin jeweils Schicht für Schicht lokale Erhärtungen erzeugt, die zum Produkt führen. Der konkrete Druckprozess (Abbildung 16) besteht dabei aus zwei iterativen Schritten: (1) Aufbringen einer Schicht aus trockenen Partikeln und (2) selektives Aufbringen einer Flüssigkeit auf die Partikelpackung mittels eines Druckkopfes oder einer Düse, um die Partikel zu binden (Lowke et al., 2018, S. 51). In einem nachgelagerten dritten Schritt erfolgt die Entnahme des Produkts aus dem Partikelbett, wodurch die gebundenen Partikel – das Produkt – von den nicht gebundenen Partikeln gelöst bzw. getrennt werden.

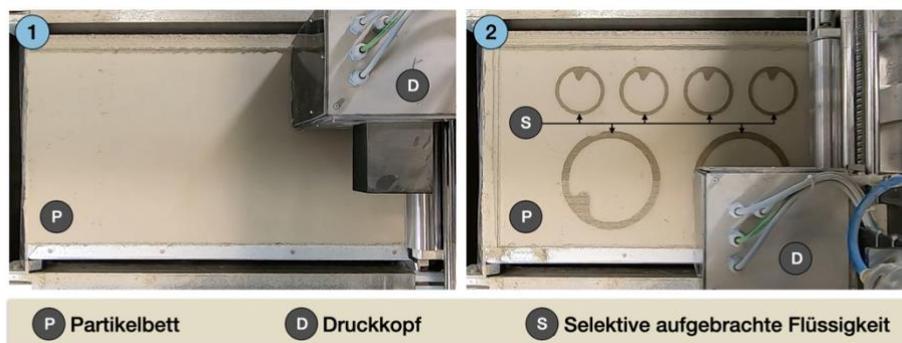


Abbildung 16: Schritte 1 und 2 zum Druckprozess des Partikelbettverfahrens

Je nachdem, welche Materialien – Partikel und Flüssigkeiten – verwendet werden (Abbildung 17) ergeben sich zum Partikelbettverfahren die Methoden der Aktivierung – Selective Binder Activation (kurz: SCA) – oder die Intrusion – Selective Paste Intrusion (kurz: SPI) bzw. eine weitere Form, das ‚Binder Jetting‘.

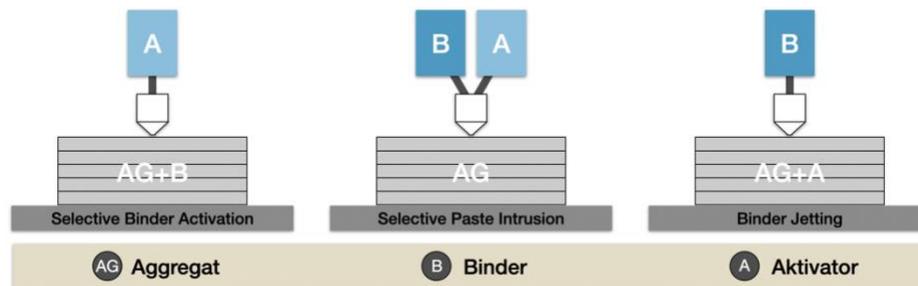


Abbildung 17: Methoden des Partikelbettverfahrens

Bei der selektiven Bindemittelaktivierung (SCA) besteht das Partikelbett aus einer trockenen Mischung mit feinen Gesteinskörnern (AG; durchschnittlicher Durchmesser < 1 mm) und einem Bindemittel (B; bei Betonbauteilen: Zement). Der Zement wird dabei lokal aktiviert, indem Wasser oder eine Wassergemischlösung (A) in die gepackten Partikel gespritzt oder gestrahlt wird, sodass die lokale Erhärtung stattfindet (Lowke et al., 2018, S. 51).

Bei der Selektive Zementsteinintrusion (SPI) besteht das Partikelbett aus größeren Gesteinskörnern (AG; durchschnittlicher Durchmesser ≤ 5 mm) ohne Bindemittel. Die Bindemittelpaste besteht aus Zement (B) sowie Wasser und Zusatzstoffen (A) und wird über Düsen auf das Partikelbett aufgetragen. Der Zementleim muss die Hohlräume zwischen den Partikeln ausfüllen, um Bauteile mit ausreichender Festigkeit zu erzeugen (ebd.).

Bei der Bindemittelstrahltechnik wird ein flüssiges Bindemittel (B) auf ein Partikelbett aufgetragen. Das Bindemittel reagiert hierbei mit einer Härter-Komponente (A) im Partikelbett (ebd.).

2.2.1.2 Ablageverfahren

Beim Ablageverfahren, auch Deposition genannt, wird das vorgemischte Material durch eine Düse nur dort ausgebracht, wo es tatsächlich benötigt wird. Das bedeutet, dass nach dem „Slicing“ in einzelne Schichten auch eine konkrete Bahnplanung erfolgen muss, in welcher der Verfahrensweg der 3D-Fertigungsmaschine (3-Achs-Anlage oder 6-Achs-Roboterarm) festgelegt wird. Der Druckablauf (Abbildung 18) sollte dabei so optimiert sein, dass die Materialablage möglichst kontinuierlich mit nur wenigen Unterbrechungen erfolgt (Mechtcherine & Nerella, 2018, S. 277). Um die Beweglichkeit des Roboterarmes zu wahren, wird das Material zumeist außerhalb der Anlage angemischt und mit einer Pumpe gefördert. Am Düsenkopf selbst können dabei Additive, wie bspw. Beschleuniger, hinzugegeben werden. Bei diesem Verfahren kann wiederum je nach Materialzusammensetzung mit entsprechenden Parametereigenschaften in Extrusion und in Shotcrete unterschieden werden.

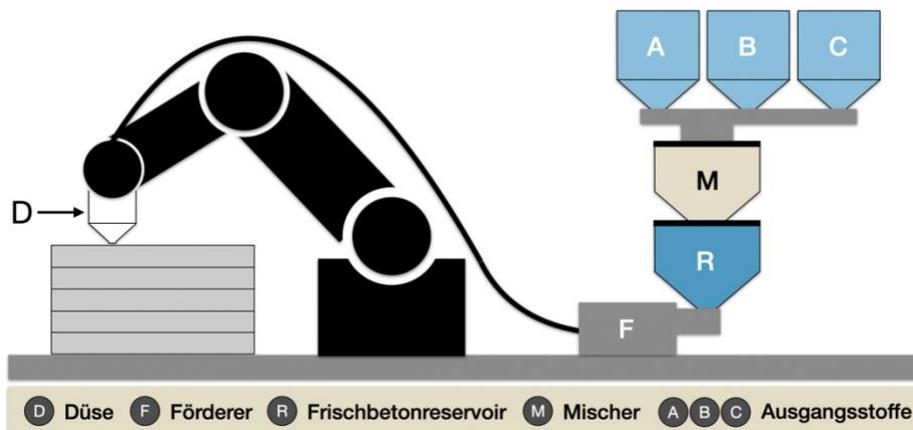


Abbildung 18: Schematische Darstellung des Systemaufbaus vom Ablageverfahren (in Anlehnung an Henke et. al., 2016, S. 14)

Die Extrusion ist eine Methode, bei der eine dickflüssige Masse mit dem Förderdruck der Pumpe ausgebracht wird und das Material unter Einwirkung des Eigengewichts ‚zerfließt‘. Hierbei liegt die Herausforderung darin, dass das Material im materialtransportierenden System bis zum Erreichen der Düse pumpfähig bleibt und nach dem Verlassen der Düse möglichst schnell deren Festigkeit entwickelt (Henke et al., 2016, S. 14). Die Form des Filaments weicht dabei von der Form der Düsenöffnung ab und bestimmt dadurch die Freiheit der Formgebung (Mechtcherine & Nerella, 2018, S. 277). „Mit abnehmender Breite und Höhe des Filaments lassen sich die geometrische Komplexität und Vielfältigkeit sowie die Präzision der Formgebung steigern, während die Produktivität zurückgeht“ (ebd., S. 280).

Beim Shotcrete ist die Betonmasse flüssiger und wird unter Druck aufgespritzt. Diese sogenannte Spritzbetontechnik wurde und wird aktuell hauptsächlich im Tunnelbau und im Bergbau eingesetzt und lässt sich schnell und einfach auf alle Arten von Oberflächen auftragen (Lindemann et al., 2018, S. 288 f.). Somit kann das Material auch flächig auf Oberflächen mit wechselnden Orientierungen aufgebracht werden und ermöglicht eine Herstellung komplexer 3-dimensionaler Betonbauteile (ebd.). Dies geht mit einer Vielzahl an Prozessparametern einher, welche in einem konstanten Verhältnis gehalten werden müssen, um einen homogenen Beton Auftrag und eine akzeptable Bauteilgenauigkeit zu erreichen (ebd.). Die Genauigkeit ist abhängig von Parametern wie dem Betonvolumenstrom, dem Förderdruck, dem Luftvolumenstrom, dem Luftdruck, der Betonbeschleunigerdosierung und von Parametern der Bahnplanung wie Düsenabstand, Geschwindigkeiten, Schichtabständen, Auftragswinkel oder Zeiten zwischen den Schichtaufträgen (ebd.).

Gegenüber dem selektiven Binden von Gesteinskörnung lassen sich mit der Extrusions- und Spritztechnik von Beton hohe Baugeschwindigkeiten realisieren, die Materialeigenschaften der Ergebnisse sind in der Regel besser und es wird nur das Material benötigt, das auch verbaut wird (Henke et al., 2016, S. 11). Nachteile bei der Extrusion gegenüber dem selektiven Binden zeigen sich in der erreichbaren geometrischen Freiheit und Feinheit (ebd.). All diese Gegebenheiten müssen unmittelbar innerhalb der Planung, also bei der Erstellung der 3D-CAD-Zeichnung, dem

Festlegen der Druckparameter und Materialzusammensetzung sowie dem Mischen und den anlagenspezifischen Handhabungen, berücksichtigt werden. Um eine einheitliche Struktur und Zuordnung der additiven Fertigungsschritte für eine Qualitätssicherung einzuleiten, gibt es bereits einen Normentwurf.

2.2.2 Normentwurf zur Qualitätssicherung

Da sich die AM-Technologien auch in anderen Branchen kontinuierlich weiterentwickeln und auch der Anspruch an Haltbarkeit, Qualität und Stabilität der Produkte steigt (Zeyn, 2017, S. 1), werden bezüglich der Qualitätssicherung bereits international geltende Normungen entworfen. Diese beziehen sich wie beispielsweise die DIN EN ISO/ASTM 52904:2020-10 auf die konkrete Verwendung des pulverbettbasierten Schmelzens von Metallen in der additiven Fertigung. Hierin werden die entsprechenden Prozessanforderungen sowie die Qualifizierung bei kritischen Anwendungen beschrieben. Im Vordergrund des Normentwurfes zur DIN SPEC 17071:2019-12 mit dem Thema „Additive Fertigung – Anforderungen an qualitätsgesicherte Prozesse für additive Fertigungszentren“ steht der Additive Fertigungsprozess. In dieser wird die Prozesskette in Pre-processing, In-processing und Post-processing mit jeweils entsprechend relevanten Bereichen (Abbildung 19) gegliedert.

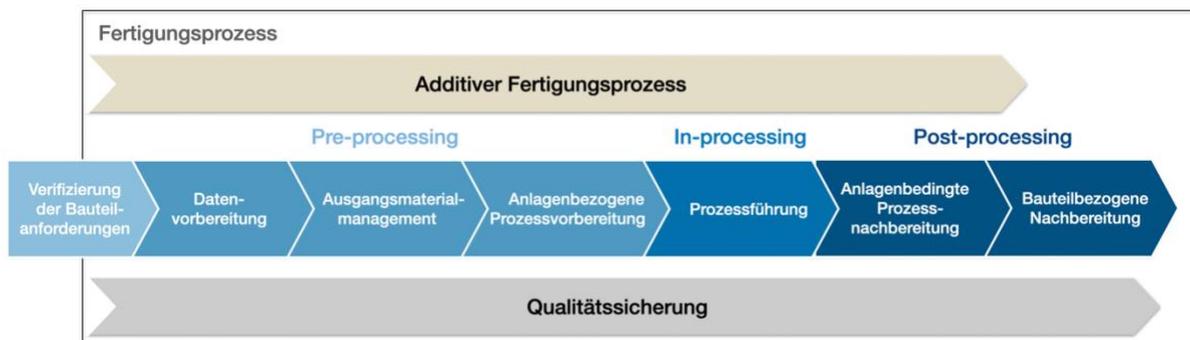


Abbildung 19: Qualitätsgesicherter Fertigungsprozess mit relevanten Bereichen (vgl. Bild 1 in DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2019, S. 7)

Die relevanten Bereiche der Prozesskette werden dabei definiert als:

- „Datenvorbereitung: Digitale Abläufe, die vor der additiven Fertigung stattfinden;
- Ausgangsmaterialmanagement: Materialflüsse, die vor der additiven Fertigung stattfinden;
- Anlagenbezogene Prozessvorbereitung: Manuelle Aktivitäten, die im unmittelbaren Umfeld der Fertigungsanlage erfolgen und der Initiierung der Prozessführung dienen;
- Prozessführung: Maschineller Ablauf, bei dem Bauteile additiv erzeugt werden;
- Anlagenbedingte Prozessnachbereitung: Aktivitäten, die im Umfeld der Fertigungsanlage erfolgen und nachgelagert zur Prozessführung durchgeführt werden;
- Bauteilbezogene Nachbereitung: Aktivitäten, die bauteilbezogen nach der Prozessführung außerhalb des unmittelbaren Umfelds der additiven Fertigungsanlage erfolgen [...]“ (DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2019, S. 6 f.).

Diese sechs Bereiche werden in der Norm nochmals über charakteristische Elemente und Schritte vertieft. Schwierigkeiten ergeben sich dabei beim Versuch einer weiteren Vereinheitlichung der unterschiedlichen Fertigungsprozesse, da hier auf „je nach Verfahren zutreffend“ bzw. „je nach Materialform zutreffend“ verwiesen wird (vgl. (DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2019, S. 7, S. 9 und S. 12). Diese erste Strukturierung in Kategorien und relevante Bereiche trifft jedoch auf alle Fertigungsprozesse der DIN zu und stellt somit eine einheitliche Grundlage weiterführender Systematisierungen sowie Analysen von additiven Fertigungsprozessen dar.

2.3 Analyse(-ansätze) technischer Prozesse und Arbeitstätigkeiten

Vor dem Hintergrund der kompetenztheoretischen Hintergründe (Kapitel 2.1) und der additiven Fertigung (Kapitel 2.2) werden in diesem Kapitel bezüglich einer Analyse technischer Prozesse elabourierte Instrumente und Ansätze aus dem Bereich der Qualitätssicherung sowie aus der Arbeits- und Organisationspsychologie dargestellt. Hierzu werden zum einen die Fehler-Möglichkeiten- und -Einfluss-Analyse – kurz: FMEA – (Abschnitt 2.3.1) und zum anderen der Mensch-Technik-Organisations-Ansatz – kurz: MTO-Ansatz – (Abschnitt 2.3.2) aufgezeigt. Sukzessive vertiefend dazu werden das Teilinstrument der Arbeitssysteme (Abschnitt 2.3.3) fokussiert und der darin umgesetzte Arbeitsablauf mit der Dokumentation entlang der Arbeitsablaufplanung (Abschnitt 2.3.4) konkretisiert.

2.3.1 Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA)

Die Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (Failure Mode and Effects Analysis; kurz: FMEA) ist eine induktive Methode zur Analyse von technischen Prozessen und Systemen. Die FMEA wird dabei im Kontext der präventiven Qualitätssicherung, des Risikomanagements und der Prozessoptimierung zur Vermeidung von Prozess- und Produktfehlern angewendet (Werdich, 2012). Aus diesem Grund erfolgt mit dem elabourierten Instrument eine systematische Dokumentation aller möglichen Fehler und deren Zusammenhänge, die bereits bei der Entwicklung neuer Produkte oder Prozesse – ‚präventiv‘ – auftreten können, und ist dadurch für die vorliegende Forschungsarbeit bedeutsam.

Mit Ihrem Aufkommen um das Jahr 1950 hat sich das Verfahren kontinuierlich weiterentwickelt und in verschiedenen Branchen etabliert (Bertsche & Dazer, 2023, S. 93). Heute ist diese qualitative Zuverlässigkeitsanalyse unter anderem aufgrund der steigenden Qualitätsforderungen und Produktkomplexität sowie der gesetzlichen Auflagen und Normen fester Bestandteil der Qualitätssicherung in der Automobilindustrie (AIAG & VDA, 2019, S. 15). In diesem Kontext haben der europäische Verband der Automobilindustrie (VDA) und die nordamerikanische ‚Automotive Industry Action Group‘ (AIAG) im Jahr 2019 ihre Vorgehensweisen zur Erstellung einer FMEA (Abschnitt 2.3.1.1) zusammengeführt. Dabei kommen je nach Einsatzbereich bzw. Zweck – zur Analyse von Prozessen, Systemen oder Produkten – und den damit verbundenen Zielsetzungen spezifische FMEA-Arten (Abschnitt 2.3.1.2) zum Einsatz.

2.3.1.1 Erstellung einer FMEA (nach AIAG & VDA)

Wie bereits erwähnt haben VDA und AIAG im Jahr 2019 deren ähnliche Ansätze zur Erstellung einer FMEA vereinheitlicht. Dabei wurde zur Durchführung einer FMEA ein aktualisierter Leitfaden herausgegeben, welcher sich in die sieben Schritte (Abbildung 20): 1) Scoping, das bedeutet Planung und Vorbereitung, 2) Strukturanalyse, 3) Funktionsanalyse, 4) Fehleranalyse, 5) Risikoanalyse, 6) Optimierung und 7) Ergebnisdokumentation gliedert (AIAG & VDA, 2019, S. 30).

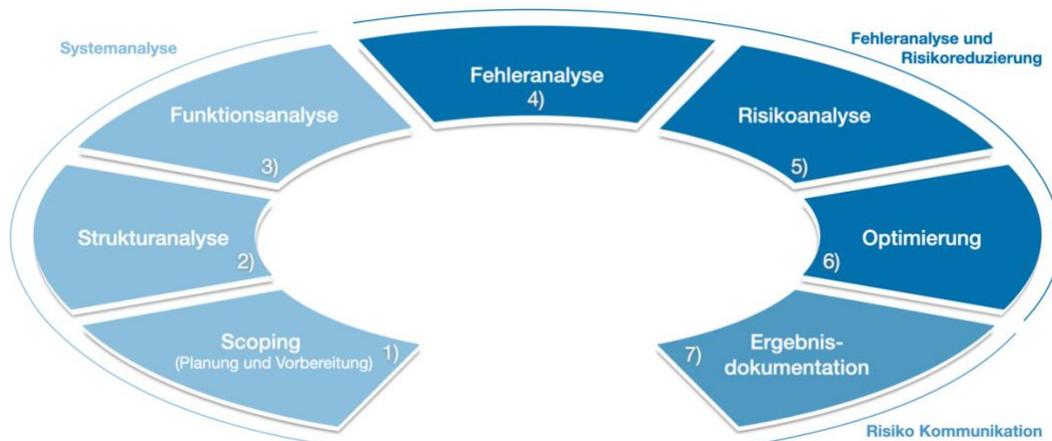


Abbildung 20: Sieben Schritte zur FMEA nach AIAG & VDA 2019

1) Im ersten Schritt der Planung und Vorbereitung wird ein multidisziplinäres FMEA-Team zusammengestellt sowie ein Projektplan erstellt. „Im Allgemeinen setzt sich das FMEA-Team aus dem Moderator, der die methodischen Kenntnisse besitzt, und dem FMEA-Team, welches das Fachwissen mitbringt, zusammen. Der Moderator, der auch geringe Sachkenntnisse besitzen kann, stellt sicher, dass die Teammitglieder Grundkenntnisse in der FMEA-Methodik haben“ (Bertsche & Dazer, 2023, S. 95). Über den 5Z-Projektplan mit dessen Leitfragen (Tabelle 9) werden hierbei erste zentrale Themenbereiche geklärt (AIAG & VDA, 2019, S. 23).

Tabelle 9: 5Z-Projektplan mit Z-Themenbereichen und Leitfragen

Z-Themenbereiche	Leitfragen
<ul style="list-style-type: none"> ▪ FMEA-Zweck ▪ FMEA-Zeitplan ▪ FMEA-TeamZusammensetzung ▪ FMEA-AufgabenZuweisung ▪ FMEA-WerkZeuge 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Warum wird die FMEA durchgeführt? ▪ Bis wann ist sie fällig? ▪ Wer ist Teammitglied? ▪ Welche Aufgaben sind durchzuführen? ▪ Womit führen wir die Analyse durch?

Davon ausgehend wird der Detaillierungsgrad über den Analyseumfang bzw. die Betrachtungstiefe der FMEA definiert sowie die Analysegrenzen über beispielsweise gesetzliche oder behördliche Vorgaben, Anforderungen, Kundenerwartungen, Lastenheft etc. spezifiziert (AIAG & VDA, 2019, S. 31 f.; S. 81 f.).

2) Im zweiten Schritt erfolgt die Strukturanalyse zum Untersuchungsgegenstand des FMEA-Zwecks – Prozess, System oder Produkt. Hierzu werden Systemelemente generiert und in einer Systemelementstruktur³ als System- bzw. Strukturbaum (Abbildung 21) angeordnet. „Die Systemstruktur ordnet, vom Topelement (Wurzelement) beginnend, einzelne Systemelemente auf unterschiedlichen hierarchischen Ebenen an. Unter jedem Systemelement können weitere Teilstrukturen (Subsysteme) mit unterschiedlicher Ebenenanzahl angeordnet werden. Der

³ Weitere Darstellungsmöglichkeiten sind Block-/Boundary- oder Prozessfluss-Diagramme (vgl. AIAG & VDA, 2019, S. 35f; S. 86)

Aufbau der Systemstruktur ist frei wählbar“ (Bertsche & Dazer, 2023, S. 113). Als Hilfsmittel zur Erstellung des System- bzw. Strukturbaumes können beispielsweise Stücklisten, Zeichnungen, Prozessablaufpläne, etc. herangezogen werden (ebd., S. 114).

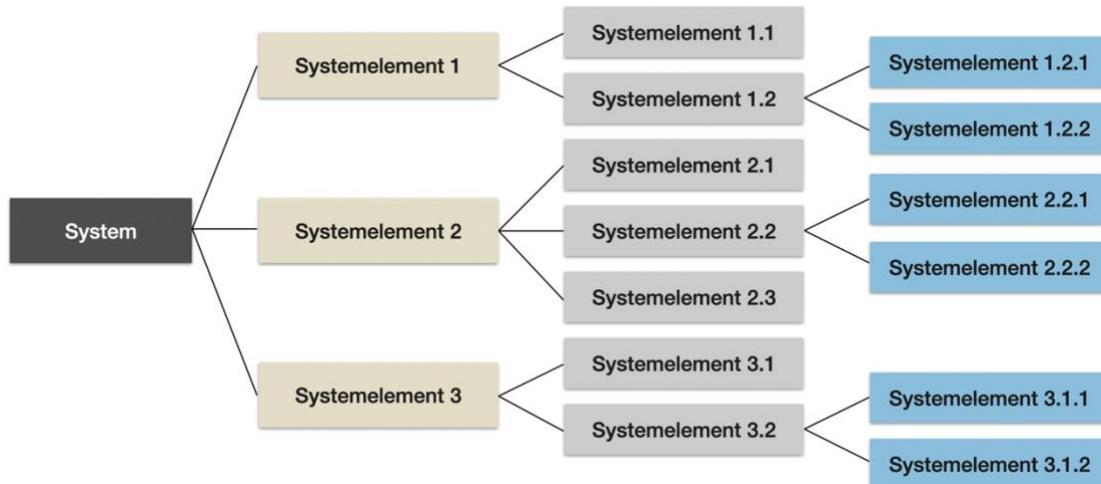


Abbildung 21: System-/Strukturbaum mit Systemelementen unterschiedlicher Ebenen (vgl. Abbildung 3.2-2 in AIAG & VDA, 2019, S. 87)

Die Anzahl der Hierarchieebenen wird über den benötigten Betrachtungsumfang gewählt (AIAG & VDA, 2019, S. 40). Für eine bessere Übersichtlichkeit können hierbei einzelne Systemelemente lediglich zur Strukturierung erstellt werden und werden im weiteren Verlauf der Analysen ausgeschlossen (Bertsche & Dazer, 2023, S. 114). Wichtig ist, dass aufgrund der Eindeutigkeit jedes Systemelement nur einmal vorkommen darf (AIAG & VDA, 2019, S. 39). Exemplarisch gezeigt kann eine Einweg-Trinkflasche in die Systemelemente Deckel, Flaschenkörper und Etikett unterteilt werden – der Deckel wiederum in Schraubgewinde, Perforierung und Frischesiegel etc.

3) Ausgehend von der Strukturanalyse werden im nächsten Schritt die Funktionen der Systemelemente generiert. Das bedeutet: Jedes Systemelement hat eine oder mehrere definierte Funktionen, Anforderungen bzw. Merkmale zu erfüllen (ebd., S. 41 f. und S. 90 f.). Als Beispiel hierzu kann der Deckel einer Trinkflasche fokussiert werden. Dieser hat u. a. die Funktionen, das Dichten zu ermöglichen, den Druck aufzunehmen, das Lebensmittelgesetz einzuhalten etc. (Werdich, 2012, S. 32). Die Generierung der Funktionen kann dabei über das „Top-Down“-Prinzip entlang der Hierarchie oder „einzeln je Systemelement“ erfolgen (Bertsche & Dazer, 2023, S. 114). „Das Zusammenwirken der Funktionen mehrerer Systemelemente für eine einzelne, ausgehende Funktion [Fokuselement] wird als Funktionsstruktur bezeichnet. Die Verknüpfung der Funktionen zu einem Funktionsnetz [Abbildung 22] bzw. einer Funktionsstruktur ist möglich“ (ebd., S.115). Mit dieser Verknüpfung werden die Einflüsse und Zusammenhänge der Funktionen zueinander dargestellt bzw. erschlossen.

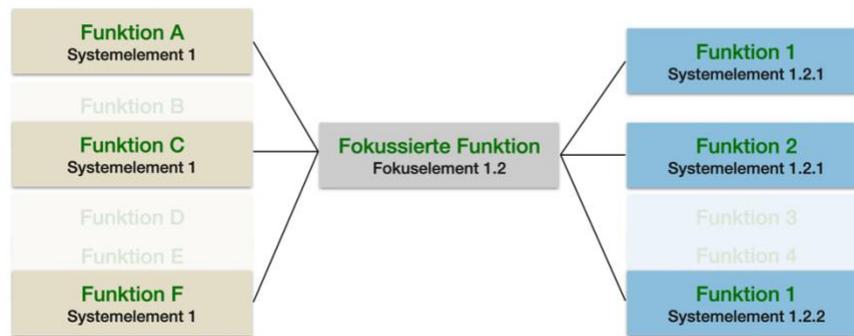


Abbildung 22: Schematische Darstellung eines Funktionsnetzes mit Fokuselement in Systemelementebene 1.2 (vgl. Abbildung 3.2-2 in AIAG & VDA, 2019, S. 93)

4) Nach der Funktionsanalyse folgt im vierten Schritt die Fehleranalyse. Hierbei werden ausgehend von den Funktionen alle möglichen Fehler in Form von Fehlfunktionen abgeleitet und damit die Abweichungen vom Soll-Zustand festgehalten (Werdich, 2012, S. 38). Ein Fehler ist demnach ein ‚Nichterfüllen einer (An-)Forderung‘. Um das Beispiel des Deckels fortzuführen, wären hierzu mögliche Fehlfunktionen, dass der Deckel undicht ist, den Druck nicht aufnehmen kann und das Lebensmittelgesetz nicht erfüllt. Durch diese Ableitung der Fehlfunktionen in den unterschiedlichen Hierarchieebenen kann – gleich der Verknüpfung zum Funktionsnetz – ein Fehlfunktionsnetz (Abbildung 23) erstellt und somit Fehlerzusammenhänge dargestellt werden. Hierbei gilt das Prinzip des Fehlerkettenmodells: Der Fehler im Fokuselements (Fehlerart) hat eine Folge auf ein übergeordnete Systemelement (Fehlerfolge: „Was passiert?“); die möglichen Ursachen dieses Fehlers (Fehlerursache: „Warum?“) liegen hierzu im untergeordneten Systemelement (AIAG & VDA, 2019, S. 52 f.; S. 96 f.).

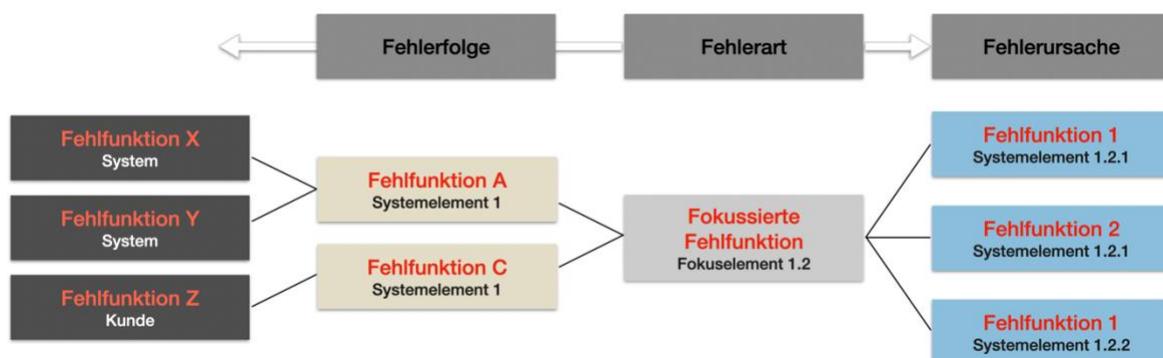


Abbildung 23: Schematische Darstellung eines Fehlfunktionsnetzes mit Fokuselement in Systemelementebene 1.2 sowie mit Darstellung der Fehlerfolgenkette (vgl. Abbildung 2.4-3 und 3.4-2 in AIAG & VDA, 2019, S. 52 und S. 101)

Sollte in diesem Schritt festgestellt werden, dass die Betrachtungstiefe nicht ausreicht, um alle möglichen Fehlerursachen zu erschließen, muss die Strukturierungstiefe erweitert werden (Bertsche & Dazer, 2023, S. 117). Entscheidend sind hierbei die Erfahrungen der FMEA-Teammitglieder sowie eine systematische Herleitung über die Funktionen. Ferner können hierzu auch Checklisten oder Schadensstatistiken herangezogen werden (ebd., S. 117).

5) Die Risikoanalyse erfolgt über die Erschließung von Vermeidungs- und Entdeckungsmaßnahmen und bezieht sich unmittelbar auf die Fehlerursachen (AIAG & VDA, 2019, S. 59). Die „Vermeidungsmaßnahmen wirken präventiv und sorgen dafür, dass die ermittelte Fehlerursache neu und über die Lebensdauer weniger wahrscheinlich wird. [...] Das bedeutet, dass der Frage: „Was wird aktuell gemacht, damit die Fehlerursache nicht auftreten kann?“ nachgegangen wird. Innerhalb der Entdeckungsmaßnahmen werden alle Maßnahmen dokumentier[t], die zur frühzeitigen Entdeckung des Fehlers beitragen. Demnach wird hier der Frage: „Was wird aktuell gemacht, um den Fehler nach dessen Auftreten zu entdecken?“ nachgegangen“ (Werdich, 2012, S. 48). Vermeidungs- und Entdeckungsmaßnahmen müssen verständlich und umfassend beschrieben sein und können Verweise auf Datenblätter, Wartungspläne, Standardverfahren etc. miteinbeziehen (AIAG & VDA, 2019, S. 60; S. 106) Die darauffolgende Risikobewertung erfolgt numerisch von 1 bis 10 entlang der Bewertungskriterien Bedeutung (B), Auftreten (A) und Entdeckung (E) (ebd., S. 63 ff.; S. 108 ff.).

- „Die Bewertungszahl B wertet die Bedeutung der Fehlerfolgen für das Gesamtsystem. Die Bewertung erfolgt stets aus der Sicht des Endverbrauchers (externer Kunde). Der Wert 1 steht für eine äußerst geringe Bedeutung, entsprechend steht der Wert 10 für eine extrem hohe Bedeutung (z. B. bei Gefährdung von Personen). Gleiche Fehlerfolgen müssen grundsätzlich gleich bewertet werden, [...]“ (Bertsche & Dazer, 2023, S. 122)
- „Die Auftretenswahrscheinlichkeit A bewertet die Wirksamkeit der Vermeidungsmaßnahmen. „Die Zahl 10 wird vergeben, wenn es nahezu sicher ist, dass eine Fehlerursache auftritt. Die Zahl 1 wird vergeben für eine sehr unwahrscheinliche Fehlerursache“ (ebd., S. 124). Wichtig hierbei ist, dass die vorhandenen Vermeidungsmaßnahmen der Fehlerursache bei der Bewertung miteinbezogen werden.
- Die Entdeckungswahrscheinlichkeit E bewertet die Wirksamkeit der Entdeckungsmaßnahmen. „Die Bewertung der Entdeckungswahrscheinlichkeit [...] erfolgt unter Berücksichtigung aller aufgelisteten Entdeckungsmaßnahmen. Auch Entdeckungsmaßnahmen, die zwar nicht direkt die Fehlerursachen, aber die zugehörigen Fehlerfolgen erkennen, werden mitberücksichtigt [...]. Die Bewertungszahl 10 wird vergeben, wenn keinerlei Entdeckungsmaßnahmen benannt werden. Die Zahl 1 wird vergeben, wenn ein Fehler mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit vor der Auslieferung an den Kunden gefunden wird“ (ebd., S. 126).

Durch das Produkt der Bewertungen wird die Risikoprioritätszahl⁴ (RPZ) errechnet und zeigt das Gesamtrisiko der Fehlerzusammenhänge auf (AIAG & VDA, 2019, S. 116). Bei der Analyse des RPZ -Wertes ist jedoch darauf zu achten, dass hier der Absolutwert meist nicht ausreichend ist oder auch eine „starre RPZ “ (alle Fehler über einem definierten Wert) zur Bestimmung des Handlungsbedarfs nur bedingt sinnvoll ist (Bertsche & Dazer, 2023, S. 127). Exemplarisch ist hier folgende Konstellation aufzuzeigen: „Eine sehr oft auftretende Fehlerursache wird häufig nicht

⁴ Die Risikoprioritätszahl ist insbesondere Bestandteil älterer Ansätze der AIAG und VDA und wird aktuell bei Verwendung von FMEA-Software noch mitberechnet. Im FMEA-Handbuch der AIAG & VDA 2019 wird die RPZ erwähnt, jedoch nicht mehr konkret behandelt (AIAG & VDA, 2019, S. 116).

entdeckt und führt beim Kunden zu einem relativ unbedeutenden Fehler. Dieser Zustand kann dennoch zu häufigen Kundenreklamationen führen und sollte durch geeignete Optimierungsmaßnahmen verbessert werden“ (ebd., S. 128). Das bedeutet, dass hierbei mit Bedacht und überlegt analysiert werden sollte, denn auch niedrige PRZ können hilfreiche Optimierungen einleiten. AIAG und VDA (2019) fokussieren in ihrem Ansatz die Aufgabenpriorität, welche eine zuverlässigere Priorisierung des Risikos darstellt und die Notwendigkeit von Maßnahmen aufzeigt (AIAG & VDA, 2019, S. 116). Zur Auswertung der Aufgabenpriorität (AP) – Hoch, Mittel, Niedrig – wird eine Tabelle mit Bezug auf die möglichen Kombinationen aus den Bewertungen zu Bedeutung, Auftreten und Entdeckung vorgegeben (ebd., S. 118 f.).

6) Ausgehend von der Risikobewertung wird im Schritt 6 eine entsprechende Optimierung festgelegt. Hierbei wird in Optimierungsmaßnahmen unterschieden, welche das Auftreten des Fehlers verhindern oder die Robustheit der Entdeckungsmaßnahme erhöhen (AIAG & VDA, 2019, S. 121). Diese Optimierungen werden mit den erwarteten Wahrscheinlichkeiten neu bewertet sowie mit Verantwortlichkeit, Fälligkeiten und bei Bedarf mit einem Maßnahmenstatus hinterlegt. Dies kann u. a. auch dazu führen, dass die Schritte 2 bis 6 in einer weiteren Umsetzungsschleife erneut durchlaufen und die FMEA hinsichtlich der Änderungen angepasst werden muss (Bertsche & Dazer, 2023, S. 131). Die endgültige Bewertung der getroffenen Maßnahmen erfolgt nach deren Umsetzung.

Endergebnis dieser Schritte 5 und 6 ist ein Formblatt zur FMEA (Tabelle 10), in welchem Fehlerfolge mit Bedeutung (Spalten 1 und 2), Fehlerart als Fokuselement (Spalte 3), alle dazugehörigen Fehlerursachen (Spalte 4) sowie jeweils deren Vermeidungsmaßnahme mit Auftretenswahrscheinlichkeit (Spalten 5 und 6) und Entdeckungsmaßnahmen mit Entdeckungswahrscheinlichkeit (Spalten 7 und 8) aufgelistet sind. Diese werden gleich zu den entsprechenden Optimierungen (Zeilen jeweils darunter) mit Maßnahmenständen versehen. Die Risikoprioritätszahl (PRZ), die Aufgabenpriorität (AP) sowie die Verantwortlichkeit (V) und Fälligkeit (T) werden in den Spalten 9 bis 11 errechnet bzw. dokumentiert.

Tabelle 10: Möglicher Aufbau des FMEA-Formblattes zu einer Funktion

Fehlerfolge	B	Fehlerart	Fehlerursache	Vermeidungs- maßnahme	A	Entdeckungs- maßnahme	E	RPZ	AP	V/T
[Funktion]										
				Maßnahmenstand mit Datum						
				Maßnahmenstand der Optimierung mit Datum						

7) Im letzten Schritt der Ergebnisdokumentation wird der finale Status festgehalten und kann den aus Schritt 1 erstellten 5Z-Projektplan aufgreifen (AIAG & VDA, 2019, S. 80). Hierzu folgt

eine Beschreibung des Betrachtungsumfangs der FMEA sowie die Hervorhebung neuer Inhalte. Zur Nachvollziehbarkeit werden die Herleitung der Funktionen und Fehlfunktionen sowie das Vorgehen bei der Risiko- und Maßnahmenpriorisierung expliziert (ebd., S. 80). Ergänzend dazu werden die Fehler mit hohem Risiko bzw. hoher Aufgabenpriorität mit aktuellem Maßnahmenstatus zusammengefasst. Bei Verwendung von nicht AIAG/VDA 2019 Standard-Bewertungstabellen müssen die entsprechenden Tabellen angehängt werden. Abschließend erfolgt ein „Lessons-Learned“, in welchem aufgetretene, organisatorische und fachliche Probleme sowie technische Risiken dargestellt werden (Bertsche & Dazer, 2023, S. 133).

Da die Durchführung einer FMEA in technischen Bereichen durchaus umfangreich und komplex ist, kann die Verwendung einer FMEA-Software nützlich sein. Aktuelle Programme greifen das vereinheitlichte Vorgehen nach AIAG & VDA 2019 auf und können die Systemstruktur abbilden sowie das Funktions- und Fehlernetz mit deren Verknüpfungen ‚über einen Klick‘ in das Formblatt überführen. Dadurch werden die Handhabung vereinfacht, Zeitaufwände reduziert sowie Übertragungsfehler vermieden. Die eben beschriebene Erstellung bzw. Durchführung einer FMEA geht je nach Zielsetzung bzw. FMEA-Zweck (Schritt 1) mit spezifischen FMEA-Arten einher.

2.3.1.2 FMEA-Arten und deren Zielsetzungen

Grund für die Durchführung einer FMEA (Abbildung 24) – wie einleitend kurz angestoßen – ist es, die Verursachung von Fehlern (blau) im Produktlebenslauf möglichst frühzeitig zu erschließen, um einer späten Offenbarung (grau) bei der Prüfung oder dem Einsatz entgegenzuwirken (Werdich, 2012, S. 4 f.). Dadurch sollten präventiv potenzielle Schwachstellen und Risiken bereits in der Definition, Entwicklung und Fertigungsplanung erschlossen und vermieden werden. Dadurch können hohe Kosten aufgrund von Fehlern – Zehnerregel der Fehlerkosten (orange) – in den späten Phasen des Produktlebenslaufs verringert werden (ebd. S. 5).

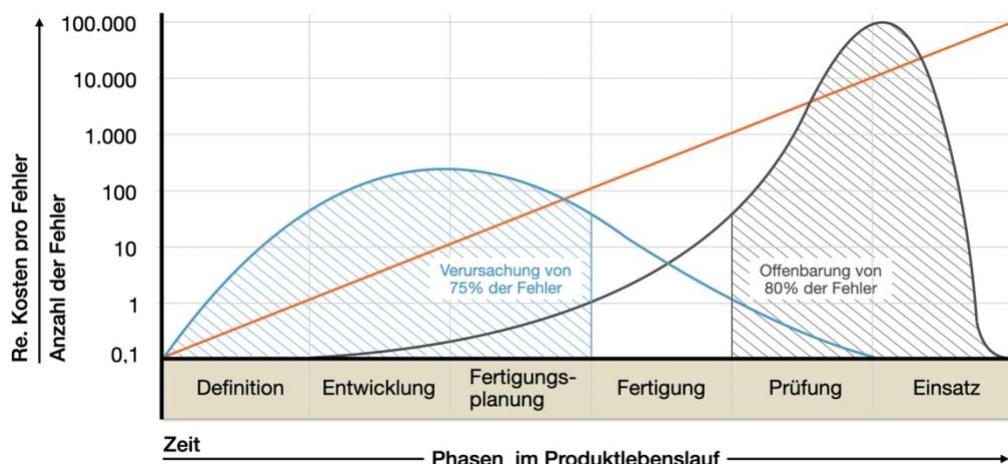


Abbildung 24: Zehnerregel der Fehlerkosten mit Fehlerverursachung im Produktlebenslauf (vgl. Abbildung 1.2 in Werdich, 2012, S. 4)

Die Methodik zur FMEA kann hierbei zu unterschiedlichen Zeitpunkten in der Entwicklung von Produkten und Prozessen angewendet werden, woraus sich spezifische FMEA-Arten mit entsprechenden Zielsetzungen ergeben (Abbildung 25). Entlang der in diesem Kontext enthaltenen systembezogenen-, komponentenbezogenen- und prozessbezogenen Entwicklungsarbeiten gliedert sich die FMEA je nach Art des zu untersuchenden Ergebnisses bzw. Zielvorgabe in die Hauptarten⁵ einer System- bzw. Komponenten-Design-FMEA (kurz: -DFMEA) und Prozess-FMEA.

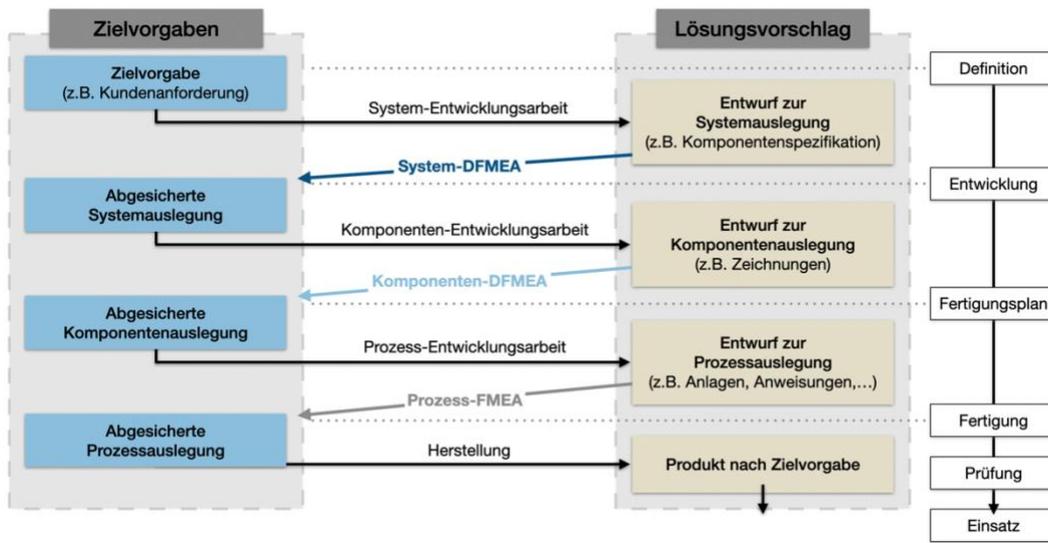


Abbildung 25: Verortung der FMEA-Arten nach Zielvorgaben und Lösungsvorschlag im Produktlebenslauf

Ausgehend von Schritt 2 und der Systemstruktur (Kapitel 2.3.1.1, Abbildung 21, S. 41) sowie dem Fehlerfolgenkettenmodell der Fehlernetzung aus Schritt 4 (Kapitel 2.3.1.1, Abbildung 23, S. 42) ergibt sich folgende hierarchisch-tabellarische Systemdarstellung (Tabelle 11). Hierüber lassen sich zudem die Zielsetzungen der FMEA-Arten herleiten bzw. begründen.

Tabelle 11: Systemhierarchie der FMEA-Arten mit Folgen, Fehlern und Ursachen (vgl. AIAG & VDA, 2019, S. 216)

FMEA-Arten	Kunde	System	Teilsystem / Systemelement	Komponenten- / (System-)Element	(Produkt-) Merkmal	
(System- / Komponenten-) Design-FMEA	Folgen	Fehler	Ursachen			
	Folgen	Folgen	Fehler	Ursachen		
	Folgen	(Folgen)	Folgen	Fehler	Ursachen	
Prozess-FMEA				Prozess- / Teilelement	Prozessschritt	Prozesseinflüsse
	Folgen	Folgen	Folgen	Folgen	Fehler	Ursachen

⁵ AIAG & VDA 2019 kategorisieren die FMEA-Arten grundsätzlich in Design- und Prozess-FMEAs. Dabei kann die Design-FMEA (DFMEA) in System-DFMEA und Komponenten-DFMEA gegliedert werden. Im Ansatz nach AIAG 2008 wurde bereits in Design- und Prozess-FMEA unterschieden. Die Ansätze nach VDA 1996 (1. Auflage) und VDA 2006 (2. Auflage) gliederten sich in System-, Produkt- bzw. Konstruktions- und Prozess-FMEA und wurden im Zuge der Vereinheitlichung integriert.

- Ziel der System-DFMEA ist es, ein reibungsloses Zusammenspiel der Komponenten eines (Teils)-Systems abzusichern, dabei die Interaktion zwischen Endnutzer und System zu untersuchen sowie die Robustheit des Systems gegen äußere Einflüsse festzustellen und gegebenenfalls zu verbessern (AIAG & VDA, 2019, S. 21). Der Aufbau bzw. die Struktur (Tabelle 11) ist so ausgerichtet, dass die Auswirkungen der Fehler auf den Kunden bzw. das System (Folgen) erarbeitet werden. Die Fehlfunktionen werden daher im System oder Teilsystem (Fehlerart) hergeleitet und die möglichen Ursachen ergeben sich aus fehlerhaften Spezifikationen oder möglichen Ausfällen der jeweiligen untergeordneten (System-)Elemente. Im Kontext der Automobilindustrie sind Beispiele für Systeme die Bremsanlage, der Antrieb, die Lenkung etc. (ebd.). „Was ein System und was Teilsysteme sind hängt vom Standpunkt oder der Verantwortlichkeit ab. Systeme liefern Funktionen auf Fahrzeugebene. Diese Funktionen werden auf Teilsysteme und Komponenten für Analyse Zwecke heruntergebrochen“ (ebd.).
- „Die Komponenten-DFMEA ist Teil eines Subsystems oder einer System-DFMEA“ (AIAG & VDA, 2019, S. 22). Ziel ist es, die Sicherheit und Funktionserfüllung einer Komponente abzusichern oder mit gesetzlichen Anforderungen abzustimmen. Der Aufbau bzw. die Struktur (Tabelle 11) ist so ausgerichtet, dass die möglichen Auswirkungen der Fehler auf den Kunden (Folgen) erarbeitet werden können. Die Fehlfunktionen werden auf Ebene der Komponente (Fehlerart) hergeleitet und die möglichen Ursachen ergeben sich aus möglichen fehlerhaften Auslegungsdaten der Bestandteile bzw. Merkmale.
- Ziel der Prozess-FMEA ist es, die Robustheit von Prozessen in der Produktion abzusichern, damit zeichnungsgerechte sowie fehlerfreie Teile hergestellt werden (AIAG & VDA, 2019, S. 22). Die Produktion inkludiert hierbei die Herstellung, die Montage sowie die Lagerung und den Transport. Der Aufbau bzw. die Struktur (Tabelle 11) ist so ausgerichtet, dass die Fehlfunktionen im Prozessschritt (Fehlerart) hergeleitet werden. Die Auswirkungen der Fehler können hierbei auf den Kunden, auf das Produktionsfeld der Weiterverarbeitung oder auf die eigene Produktion (Folgen) erarbeitet werden. „Der entsprechende Prozessfehler stellt die Unfähigkeit des Prozesses dar, die in der Konstruktion vorgegebenen Eigenschaften herzustellen. Führt allein die Nichteinhaltung eines Produktmerkmals zur Fehlerfolge, ist in diesem Fall die Fehlerfolge in der Design-FMEA dieselbe wie in der Prozessebene. Sämtliche Fehlerfolgen, die durch Fehler in der Prozess-FMEA verursacht werden und nicht in der Design-FMEA identifiziert wurden, müssen in der Prozess-FMEA neu definiert und bewertet werden [Zusammenhang DFMEA und PFMEA in Tabelle 11]. Die Fehlerfolgen für das Produkt, System bzw. den Endnutzer und die zugehörige Bedeutung müssen dokumentiert werden, falls sie bekannt sind – sie dürfen nicht nur angenommen werden“ (ebd., S. 113). Zur Analyse der Ursachen werden die möglichen Prozesseinflüsse ‚Mensch‘, ‚Maschine‘, ‚Material‘ und ‚Mitwelt‘ – sogenannte 4M’s – mit ‚Methode‘ – 5M’s – bzw. mit ‚Messung‘ – 6M’s – vorgegeben (ebd., S. 88).

2.3.2 Mensch-Technik-Organisations-Ansatz (MTO)

Das MTO-Konzept nach Ulich (2011) stellt einen ganzheitlichen Ansatz zur Analyse von Unternehmen dar und ist im Bereich der Arbeitspsychologie verortet (Ulich, 2011, S. 85 ff.). Der Ansatz wird dazu verwendet, die gegenseitigen Abhängigkeiten, Wechselwirkungen sowie das Zusammenwirken von ‚Mensch, Technik und Organisation‘ zu untersuchen, um Arbeitsplätze entsprechend den Bedürfnissen und Fähigkeiten der Menschen zu gestalten (ebd.). Wie die Studie nach Schüpbach und Zölch (2004) bereits zeigte, lässt sich die MTO-Analyse „in den konzeptuellen und methodischen Grundzügen mit Anpassungen auch auf Krankenhäuser, Schulen, Verwaltungen etc. übertragen“ (Schüpbach & Zölch, 2004, S. 208) und ist insbesondere aufgrund des Zusammenwirkens von Mensch und Technik in Organisationen in ganzheitlicher Betrachtung für die vorliegende Forschungsarbeit hoch relevant.

Für das MTO-Konzept „wurden auf der Basis des soziotechnischen Systemansatzes und der Handlungsregulationstheorie einerseits neue Vorgehensweisen entwickelt sowie andererseits bereits bestehende Verfahren wie z.B. das VERA-, RHIA- und KABA-Verfahren integriert“ (Ulich, 2011, S. 86). Ulich gliedert den MTO-Ansatz (Tabelle 12) in die vier Ebenen Unternehmen, Organisationseinheit, Gruppe und Individuum (ebd., S. 87). Diese werden entlang sieben sukzessiv vertiefenden Analyseebenen bzw. Schritten konkretisiert (ebd., S. 88). Neben der soziotechnischen Geschichte des Unternehmens und einer Analyse auf Ebene des Unternehmens erfolgen die Analysen zu Auftragsdurchläufen und Arbeitssystemen auf der zweiten Ebene der Organisationseinheit. Die Analyse von Arbeitsgruppen und die bedingungsbezogene Analyse von Schlüsseltätigkeiten erfolgen im Rahmen der Ebene der Gruppe. Die personenbezogene Arbeitsanalyse ist der kleinsten Ebene, dem Individuum, zugeordnet. Ulich weist diesen Elementen zudem entsprechende methodische Erhebungs- bzw. Bewertungsinstrumente zu (ebd.).

Tabelle 12: Analyseeinheit mit Schritten, Gegenständen und Methodik der MTO-Analyse (vgl. Strohm & Ulich, 1999 sowie Ulich, 2011, S. 88)

Analyseeinheit (Schritt)	Gegenstand	Methodik
Ebene des Unternehmens		
Analyse auf Ebene des Unternehmens (1)	Analyse von Unternehmensziele, Unternehmensstrategie, Unternehmensorganisation, Produkte und die Produktionsbedingungen, Personalstruktur, Technikeinsatz, Qualitätsmanagement, Innovationsverhalten, Lohnsystem, Arbeitszeitmodelle, Mitwirkungsrechte, etc.	Dokumentenanalysen, Experteninterviews
Analyse der soziotechnischen Geschichte (7)	Analyse von Strategien, Vorgehensweisen und Meilensteinen	Dokumentenanalysen, Experteninterviews

	bei der technisch-organisatorischen Entwicklung des Betriebes	
Ebene der Organisationseinheit		
Analyse von Auftragsdurchläufen (2)	Analyse des Auftragsdurchlaufes von 2 bis 5 typischen und abgeschlossenen Aufträge	Dokumentenanalysen, Ablauforientierte Betriebsbegehungen, Experteninterviews, Gruppeninterviews
Analyse von Arbeitssystemen (3)	Analyse von Inputs, Transformationsprozessen, Outputs, sozialem und technischem Teilsystem, technisch-organisatorischer Gestaltung, Schwankungen und Störungen, Hauptproblemen, etc.	Dokumentenanalysen, Experteninterviews, Gruppeninterviews
Ebene der Gruppen		
Analyse von Arbeitsgruppen (4)	Analyse von Möglichkeiten zur kollektiven Regulation von Arbeitsaufgaben und Arbeitszeit, Umgebungsbedingungen, Qualifizierung, Leistung, Qualität, interner und externer Koordination etc.	Dokumentenanalysen, Gruppeninterviews, Beobachtungsinterviews
Bedingungsbezogene Analyse von Schlüsseltätigkeiten (5)	Analyse von Arbeitseinheiten, Tätigkeitsabläufen, Kommunikations- und Kooperationserfordernissen, Mensch-Maschine-Funktionsteilung und -Interaktion, Regulationshindernissen, etc.	Ganzschichtbeobachtungen, Beobachtungsinterviews, Experteninterviews
Ebene des Individuums		
Personenbezogene Arbeitsanalyse (6)	Analyse von Erwartungen der Beschäftigten an ihre Arbeit sowie Wahrnehmungen der Arbeitssituation durch die Beschäftigten	Schriftliche Erhebung mit Skalierungsverfahren

Die Analyse auf Ebene des Unternehmens und die soziotechnische Geschichte des Betriebes „stellen den Bezugsrahmen für weitere Analyseeinheiten dar und wirken in unterschiedlicher Weise als determinierende Einheiten bzw. Randbedingungen“ (ebd., S. 87). Hiermit wird eine breite Orientierung über den Betrieb geschaffen, sowie zugleich verschiedene Bewertungen aus arbeits- und organisationspsychologischer Perspektive möglich (ebd.). Zur Methodik werden entsprechende Dokumente analysiert sowie Experteninterviews geführt.

Ausgehend davon werden Organisationseinheiten mit deren Formen der Arbeitsteilung bzw. der funktionalen Trennung oder Integration im Betrieb sowie deren Primäraufgabe analysiert (ebd.).

Hierzu werden über ablauforientierte Betriebsbegehungen gemeinsam mit den Experten die Aufträge durchlaufen. Dies erfolgt in Abhängigkeit von Produkten und Produktionsbedingungen. Das bedeutet, es erfolgt eine Differenzierung zwischen kundenunabhängiger Produktion oder inhaltlich voneinander losgelösten Aufträgen (ebd., S. 90). „Die Bewertung von Auftragsdurchläufen wird anhand der folgenden fünf Kriterien vorgenommen: Funktionale Integration, Planungsqualität, Anzahl der Schnittstellen, Qualität der Schnittstellen, notwendige und überflüssige Redundanzen“ (ebd. S. 90). Zugleich mit der Analyse des Auftragsdurchlaufs werden Arbeitssysteme erschlossen. Das Arbeitssystem mit den in Tabelle 12 aufgezeigten Gegenständen charakterisiert sich durch einen inneren Aufgabenzusammenhang und kann aufgabenbezogen von anderen Arbeitssystemen abgegrenzt werden (ebd., S. 90). Die Bewertung erfolgt zum einen über ein dreistufiges Netzdiagramm (Abbildung 26) entlang der Kriterien: Unabhängigkeit der Organisationseinheit, Aufgabenzusammenhang innerhalb der Organisationseinheit, Einheit von Produkt und Organisation, Polyvalenz der Beschäftigten, technisch-organisatorische Konvergenz, Selbstregulation (ebd., S. 91).

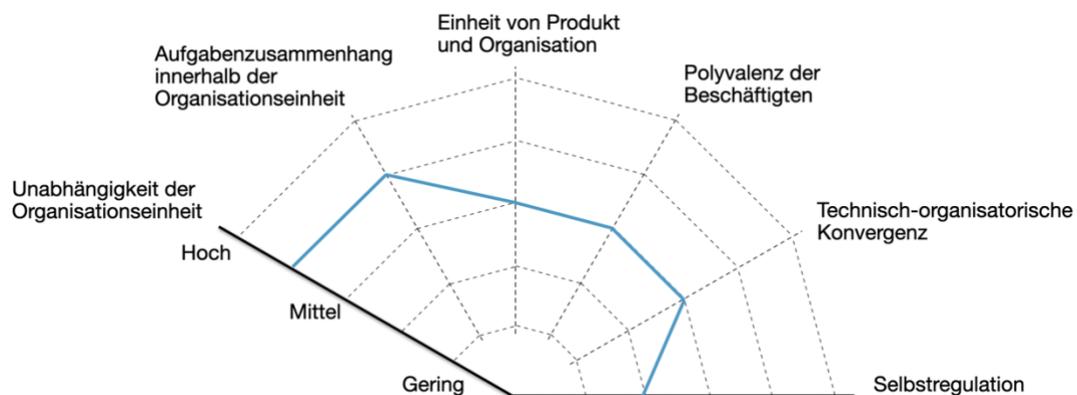


Abbildung 26: Exemplarisches Netzdiagramm zur Bewertung von Arbeitssystemen (vgl. Ulich, 2011, S. 91)

Zum anderen erfolgt eine kriterienorientierte Bewertung der Schwankungen, Störungen und Hauptprobleme. In diesem Zusammenhang kann zugleich eine Ursachensuche mit korrekativer Gestaltung einhergehen (ebd., S. 91).

Die „Arbeitssystemanalysen und Analyse der Gruppenarbeit dienen zugleich der Ermittlung von Schlüsseltätigkeiten, die bedingungsbezogen analysiert werden“ (ebd., S. 87). Innerhalb der Ebene zu Analyseeinheit der Gruppe wird die kollektive Regulation von Arbeitsaufgaben und damit verbundene Mitentscheidungen bzw. deren Autonomiegrad betrachtet (ebd., 91 f.). Bezüglich der Methodik werden hier Dokumentenanalyse, Gruppeninterviews und Beobachtungsinterviews eingesetzt. Hierbei wird unter anderem auf das Verfahren zur Ermittlung von Regulationserfordernissen in der Arbeitstätigkeit – kollektive Handlungsregulation (kurz: VERA-KHR) – zurückgegriffen. Die Schlüsseltätigkeiten werden über Ganzschichtbeobachtungen von Arbeitstätigkeiten repräsentativer Personen erschlossen und auf Basis der Verfahren VERA, KABA und RHIA bewertet (ebd., S. 92). „Mit diesen Bewertungen wird u. a. abgeschätzt, inwieweit die analysierten Tätigkeiten die arbeitspsychologischen Anforderungen an eine qualifizierende und persönlichkeitsförderliche Arbeitsgestaltung erfüllen“ (ebd., S. 92).

Um diese objektiven Bedingungen mit subjektiven Wahrnehmungen abzugleichen bzw. sie zu überprüfen, werden die Arbeitssituation und die Arbeitsbedingungen durch die Beschäftigten auf Ebene des Individuums eingeschätzt und bewertet. Das MTO-Konzept verwendet dabei Fragebögen aus der (Salutogenetischen-) Subjektiven Arbeitsanalyse (kurz: SALSA und SAA). Die Beschäftigten werden hierbei zu den Anforderungen, Belastungen, Ressourcen und zur Zufriedenheit befragt und können positive als auch negative Aspekte zur jetzigen Arbeitssituation, Änderungswünsche und Verbesserungsvorschläge anbringen (ebd., S. 92 f.).

Zusammengefasst integriert der MTO-Ansatz diverse Instrumentarien und Methoden zur Analyse und Bewertung eines Unternehmens, dessen technischen Prozesse sowie der Arbeit der Beschäftigten. Dabei werden

- die Unternehmensorganisation mit der soziotechnischen Geschichte berücksichtigt,
- über Organisationseinheiten entlang von Auftragsdurchläufen und Arbeitssystemen strukturiert und systematisiert,
- Arbeitsgruppen über Arbeitsaufträge identifiziert,
- zugleich Schlüsseltätigkeiten analysiert und
- dies mit den subjektiven Wahrnehmungen der Beschäftigten ergänzt.

2.3.3 Arbeitssysteme

Vor dem Hintergrund der Systemstruktur zur FMEA (FMEA – Schritt 2 in Abschnitt 2.3.1.1) und der Schnittstelle zwischen Unternehmen bzw. prozessorientierten Organisationseinheiten und Arbeitsaufträgen/-tätigkeiten im Rahmen der MTO-Analyse stellen die Arbeitssysteme einen interessanten sowie für die Forschungsarbeit relevanten Ansatzpunkt dar. In diesem Kapitel werden daher die Hintergründe der Arbeitssysteme nach MTO (Abschnitt 2.3.3.1) beleuchtet sowie ein weiterer Ansatz zur Standardisierung von Arbeitssystemen nach DIN EN ISO 6385:2016-12 (Abschnitt 2.3.3.2) und anlehnend daran der praxisorientierte Consulting-Ansatz nach REFA (Abschnitt 2.3.3.3) aufgezeigt.

2.3.3.1 Arbeitssysteme nach MTO

Der MTO-Ansatz greift zum Thema Arbeitssysteme auf das Konzept der soziotechnischen Systemgestaltung zurück und geht davon aus, dass es sich bei Arbeitssystemen „um Systeme [handelt], die aus einem sozialen und einem technischen Teilsystem bestehen, die je für sich und in ihrer Beziehung zueinander zu analysieren, aber gemeinsam zu gestalten sind“ (Ulich, 2011, S. 85). Das soziale Teilsystem fokussiert dabei die Beschäftigten, das technische Teilsystem die Betriebsmittel sowie technische und räumliche Arbeitsbedingungen (Ulich, 2013, S. 4). Die Verknüpfung beider Teilsysteme besteht in der Arbeitsrolle der Beschäftigten, welche zum einen die im Produktionsprozess wahrzunehmenden ‚Funktionen‘ festlegt und andererseits die Kooperationsbeziehungen für die Ausführung der Arbeit bestimmt (ebd., S. 4). In diesem Kontext wird vom Primat der Aufgabe ausgegangen, da die Arbeitsaufgabe einerseits das soziale mit dem technischen Teilsystem sowie andererseits den Menschen mit den organisationalen Strukturen verknüpft (ebd., S. 6). Daraus folgt, dass sich die Arbeitssysteme über ihren inneren

Aufgabenzusammenhang sowie aufgabenbezogen von anderen Arbeitssystemen abgrenzen (ebd., S. 7). Die Primäraufgaben werden hierbei zur Generierung der primären Arbeitssysteme verwendet. „Primäre Arbeitssysteme sind identifizierbare und abgrenzbare Subsysteme einer Organisation, z. B. eine Fertigungs- oder eine Montageabteilung“ (ebd., S. 4). Davon ausgehend folgen Sekundäraufgaben, welche zur Erfüllung der Primäraufgabe beitragen und Gestaltungsspielräume aufweisen (ebd., S. 5). „So kann etwa die Einführung eines Produktionsplanungs- und -steuerungssystems, das die Auftragsbearbeitung inhaltlich und zeitlich bis ins Einzelne festlegt, vorher vorhandene individuelle und/oder kollektive Tätigkeitsspielräume zerstören. [...] Deshalb kommt unter den Bedingungen des Einsatzes fortgeschrittener Technologien der Auslegung der Sekundäraufgaben wachsende Bedeutung zu“ (ebd. S. 5). Die Konkretisierung von Primär- und Sekundäraufgaben geht mit der Einführung von unterschiedlichen Ebenen an Arbeitssystemen einher. Zur Analyse der Arbeitssysteme legt das MTO-Konzept die konkreten Gegenstände Inputs, Transformationsschritte, Outputs, technisch-organisatorische Gestaltung sowie die damit verbundenen Schwankungen, Störungen und Hauptprobleme fest (Ulich, 2011, S. 88) und werden nicht weiter expliziert.

2.3.3.2 Arbeitssysteme nach DIN EN ISO 6385:2016-12

Im Kontext der Standardisierung legt die DIN EN ISO 6385:2016 ‚Grundsätze der Ergonomie für die Gestaltung von Arbeitssystemen‘ fest. Durch die darin enthaltenen Definitionen grundlegender Begrifflichkeiten stellt die Norm eine bedeutende Leitlinie zur Gestaltung von Arbeitssystemen dar und kann mit diesen international geltenden Grundsätzen „auf viele andere menschliche Tätigkeiten“ angewendet werden (DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2016, S. 6). Die DIN nennt hierzu exemplarisch Fachleute der Arbeitswissenschaft, Projektleitende und Entwickelnde sowie Bereiche der Produktion, des Handels, des Gesundheitswesens, der Lehre und des Trainings etc. (ebd.). Das Arbeitssystem nach DIN EN ISO 6386:2016-12 wird definiert als:

„System [0], welches das Zusammenwirken eines einzelnen oder mehrerer Arbeitender [1] mit den Arbeitsmitteln [2] umfasst, um die Funktion des Systems [3], innerhalb des Arbeitsraumes [4] und der Arbeitsumgebung [5] unter den durch die Arbeitsaufgaben [6] vorgegebenen Bedingungen, zu erfüllen“ (DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2016, S. 7).

Die enthaltenen Begriffe werden in DIN EN ISO 6385:2016-12 (siehe DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2016, S. 7 ff.) weiter spezifiziert:

- 1) Der Arbeitende ist eine „Person, die innerhalb des Arbeitssystems [0] eine oder mehrere Tätigkeiten zur Erreichung eines Ziels durchführt“;
- 2) Arbeitsmittel sind „Werkzeuge, einschließlich Hardware und Software, Maschinen, Fahrzeuge, Geräte, Möbel, Einrichtungen und andere im Arbeitssystem [0] benutzte (System-) Komponenten“:

- 3) Die Funktion des Systems ist eine „umfassende Menge bestimmter Aktivitäten, die innerhalb eines Arbeitssystems durchgeführt werden“;
- 4) Der Arbeitsraum ist ein „Raum, der einer oder mehreren Personen innerhalb des Arbeitssystems [0] zur Durchführung der Arbeitsaufgabe [6] zugeordnet wird“;
- 5) In der Arbeitsumgebung befinden sich „physikalische, chemische, biologische, organisatorische, soziale und kulturelle Faktoren, die einen Arbeitenden [1] umgeben“;
- 6) Die Arbeitsaufgabe ist „zur Erreichung eines vorgesehenen Arbeitsergebnisses erforderliche Aktivität oder Anzahl von Aktivitäten des Arbeitenden [1]“.

Weitere Definitionen betreffen die Begriffe⁶:

- Arbeitsorganisation, als „interagierende Arbeitssysteme [0], deren Zusammenwirken ein bestimmtes Gesamtergebnis erzielt“;
- Arbeitsablauf, als „räumliche und zeitliche Abfolge des Zusammenwirkens von Arbeitenden [1], Arbeitsmitteln [2], Materialien, Energie und Information innerhalb eines Arbeitssystems [0]“;
- Tätigkeiten, als „Organisation und zeitliche und räumliche Abfolge der Arbeitsaufgaben [6] einer Person oder die Kombination der gesamten menschlichen Arbeitshandlung eines Arbeitenden [1] in einem Arbeitssystem [0]“.

Neben den definitorischen Setzungen liegt der Fokus des Rahmenwerkes auf dem Gestaltungsprozess von Arbeitssystemen und deren Bewertung und Überwachung. Ziel ist es, die technischen, wirtschaftlichen, organisatorischen und menschlichen Einflussfaktoren innerhalb eines Arbeitssystems bestmöglich für das Arbeitsverhalten und Wohlbefinden des Arbeitenden umzusetzen (DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2016, S. 5). Da „der Mensch als Hauptfaktor und integraler Bestandteil des zu gestaltenden Systems, einschließlich des Arbeitsablaufs und der Arbeitsumgebung“ anzusehen ist, sind die Arbeitenden unmittelbar im Gestaltungsprozess von Arbeitssystemen einzubeziehen (ebd., S. 10). Einerseits, um suboptimale Lösungen zu vermeiden, und andererseits, da die Erfahrungen der Arbeitenden eine unverzichtbare Wissensgrundlage darstellen (ebd., S. 10). Die zugrundeliegende Methode (Tabelle 13) gliedert sich in sechs konkrete Phasen mit Vorgehensweisen, die von einem multidisziplinären Gestaltungsteam als iterativer Prozess durchlaufen werden (ebd., S. 11). Hierbei gilt es, die hauptsächlichen Wechselwirkungen zwischen einer oder mehreren Personen und den Bestandteilen des Arbeitssystems (in der Tabelle abgekürzt mit AS) unmittelbar zu berücksichtigen (ebd., S. 10).

⁶ In diesem Rahmen nicht aufgelistete Definitionen zu Begriffen sind: Wohlbefinden, Ergonomie Arbeitswissenschaft, Arbeitsraum, äußere Arbeitseinwirkung Arbeitsbelastung, Arbeitsbeanspruchung, Gebrauchstauglichkeit, menschenzentrierte Gestaltung, Zugänglichkeit, Funktionszuordnung, Arbeitsplatz, Arbeitsermüdung, Zielpopulation.

Tabelle 13: Tabellarische Zusammenfassung in Gestaltungsphase und Vorgehensweisen der DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2016, S. 11–21

Index	Gestaltungsphase	Vorgehensweisen / Verfahren und Techniken (mit Verweis auf EN 16710-2)
P1	Formulierung von Zielen (Anforderungsanalyse)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Informationsbeschaffung zum Arbeitsprozess und ggf. vorhandenen AS ▪ Erstellung eines Katalogs mit Zielen, Anforderungen und Bedingungen (Leistung, Sicherheit, Gesundheit, Wohlbefinden, technische Leistungsanforderung) ▪ Beschreibung der Bestandteile des AS hinsichtlich Betriebsweise und Instandhaltung, welche die Leistung des Menschen oder des Systems beeinflussen
		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Instrumente zur Beurteilung von Arbeitsbedingungen, Beobachtung vor Ort, Befragungen, usw.
P2	Analyse und Zuordnung der Funktionen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Festlegung von Funktionen zur Erfüllung der in P1 gestellten Anforderungen ▪ Ermittlung der Aufteilung der Funktionen zwischen Arbeitenden und Arbeitsmittel zur Sicherstellung der Angemessenheit und Wechselwirkung ▪ Identifikation der Fähigkeiten und einschränkenden Faktoren menschlicher und technischer Komponenten ▪ Generierung von Aufgaben und Tätigkeiten unter Zuordnung der Funktionen zu Arbeitenden und Arbeitsmittel
		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Pläne, Bewertungsinstrumente, Modelle des Menschen und Laborversuche
P3	Konzeption der Gestaltung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Konzeptionelle Gestaltung des AS durch Umwandlung der Funktionen in Anforderungslisten an: <ul style="list-style-type: none"> - Gestaltung der Aufgaben, Tätigkeiten und Arbeitsorganisation - Gestaltung der Arbeitsmittel, Werkzeuge, des Arbeitsplatzes und Arbeitsumgebung

		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Simulation, Aufgabenanalyse, maßstäbliche Modelle und Modelle natürlicher Größe sowie Gruppendiskussionen
P4	Gestaltung (oder Entwicklung) der einzelnen Elemente	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gestaltung der Bestandteile des AS: <ul style="list-style-type: none"> - Arbeitsorganisation (Wirkung von Tätigkeiten und AS aufeinander) - Arbeitsaufgaben (Faktorenbetrachtung der Funktionsumwandlung hinsichtlich Menschen) - Tätigkeiten (Zielausrichtung, Fähigkeiten und Anforderungsniveau, Arbeitsbelastung, Ergonomie) - Arbeitsumgebung (soziale, physikalische, chemische, biologische Bedingungen und Grenzen, Arbeitskleidung, Arbeitszeiten) - Arbeitsmittel und Schnittstellen (physische, psychische und mechanische Faktoren, Kommunikation, Informationsübertragung, Entscheidungsfindung, Mensch-Maschine-Interaktion, Kontrollelemente) - Arbeitsraum und Arbeitsplatz (Gesundheit, Ergonomie, Sicherheit) ▪ Iteration dieses Gestaltungsprozesses unter Berücksichtigung derer Wechselwirkungen
		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Geeignete Verfahren und Techniken
P5	Realisierung (R), Einführung (E), Anpassung (A), Verifizierung (V1) und Validierung (V2)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ R: Konstruktion, Herstellung oder Erwerb neuer technischer Ausstattungen und Aufbau vor Ort ▪ E: Einweisung, Unterweisung, Schulung, Bereitstellung von Informationen und Dokumentationen ▪ A: finale Gestaltung und Inbetriebnahme, Identifikation von notwendigen Änderungen zur Leistungsoptimierung und Gestaltungsverbesserung des AS ▪ V1: Sicherstellung der geforderten Eigenschaften und Anforderungen, Gestaltungsbeschreibungen ▪ V2: Funktionsfähigkeit des AS bzgl. Systemleistung, Gesundheit, Wohlbefinden und Sicherheit
		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Geeignete Verfahren und Techniken

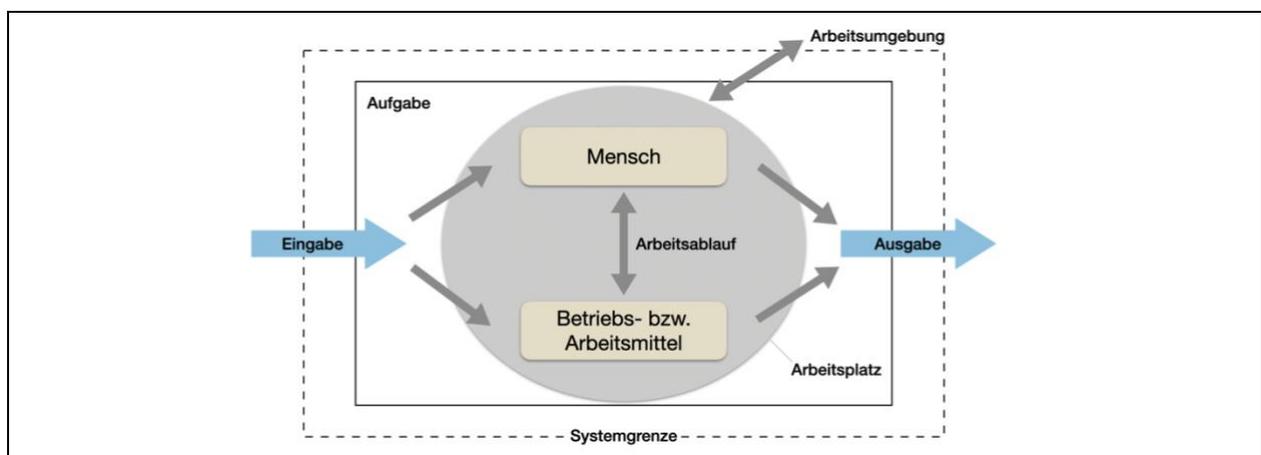
P6	Bewertung und Überwachung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Einführung von Bewertungs- und Überwachungsprozessen (Gesundheit und Wohlbefinden, Sicherheit, Systemleistung, Gebrauchstauglichkeit, Kosten-Nutzen) ▪ Gesamtbewertung der Gestaltungsqualität des AS (Soll-Ist-Abgleich der Ergebnisse) ▪ Aufzeichnung von Problemen und Erfahrungen sowie Maßnahmen zur Korrektur
		<ul style="list-style-type: none"> ▪ ISO/TR 16982

Da die Gestaltung und Wirksamkeit von Arbeitssystemen nach DIN 6385:2016 von spezifischen Verfahren und Techniken abhängig sind, gibt es Unternehmen, die sich in diesem Bereich auf Beratung und Consulting spezialisiert haben und diese Normung berücksichtigen.

2.3.3.3 Arbeitssysteme nach REFA

REFA (Rationalisierungs- und Entwicklungsverband für Arbeit) ist beispielsweise eine deutsche Organisation für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung, die sowohl Ausbildungen, Weiterbildungen und Schulungen als auch Consulting für Unternehmen anbietet. Im Ansatz nach REFA werden die Grundsätze der DIN EN ISO 6385 aufgegriffen, erweitert und mit entsprechenden Methoden der prozessorientierten Arbeitsorganisation hinterlegt – u. a. mit dem Ziel, den Wettbewerbserfolg von Unternehmen festzustellen und zu verbessern. „Arbeitsorganisation im Rahmen einer prozessorientierten Organisations- und Unternehmensentwicklung ist das Schaffen von Bedingungen und Voraussetzungen für das Zusammenwirken von Arbeitssystemen, durchgängig über alle Prozessebenen in der Organisation bzw. Unternehmen“ (Binner, 2011, S. 7). Arbeitssysteme nach REFA (Tabelle 14) werden hierbei in ihrer Funktion als Prozessbausteine oder auch als betriebliche Leistungseinheiten definiert (ebd., S. 132). Die Beschreibung des Arbeitssystems erfolgt über die sieben Systembegriffe und wird mit entsprechenden Beschreibungen spezifiziert.

Tabelle 14: Arbeitssystemelemente mit Beschreibung (vgl. Binner, 2011, S. 133 und REFA, 1984, S. 94)



Systemelement	Beschreibung
Arbeitsaufgabe	Aufforderung an Menschen, Tätigkeiten auszuüben, die der Zielerreichung dienen. Sie kennzeichnen den Zweck des Arbeitssystems.
Eingabe (Input)	Im Allgemeinen Arbeitsgegenstände, Informationen und Energie, die im Sinne der Arbeitsaufgabe verändert oder verwendet werden.
Ausgabe (Output)	Im Allgemeinen Arbeitsgegenstände, Informationen und Energie, die im Sinne der Arbeitsaufgabe verwendet oder neu erstellt wurden.
Arbeits- bzw. Betriebsmittel	Systemelemente, die zur effektiven Ausführung der Aufgabe unerlässlich sind. Die Auswahl der geeigneten Betriebs- bzw. Arbeitsmittel (des Arbeitsverfahrens) sowie deren technischer Zustand sind entscheidend. zum Beispiel Anlagen, Maschinen, Werkzeuge und Organisationsmittel.
Mensch	Aktives Element in der Arbeitssystembetrachtung. Er bestimmt im Zusammenwirken mit Betriebs- bzw. Arbeitsmittel und der Organisation die Kapazität des Arbeitssystems. Sein erfolgreiches Wirken hängt einerseits von seinem Leistungsvermögen, andererseits von der ergonomischen Gestaltung seines Wirkungsbereichs ab.
Umwelteinflüsse	Zu einen alle von außen auf das System wirkenden physikalischen, chemischen und biologischen Einflüsse (Immissionen). Zum anderen die vom Arbeitssystem ausgehenden, auf seine Umgebung wirkenden Einflüsse (Emissionen)
Arbeitsablauf	Überführt die Eingabe gemäß der Arbeitsaufgabe in die Ausgabe, beschreibt das räumlich-zeitliche Zusammenwirken von Menschen mit den Betriebs- bzw. Arbeitsmittel. Beim Menschen bezeichnet man ihn als Arbeitsmethode bzw. Arbeitsweise und kann in Makro- oder Mikro-Ablaufschritte gegliedert bzw. zerlegt werden. Wird auch als Prozess- bzw. Arbeitssystem bezeichnet.

Arbeitssysteme können im Zusammenspiel und in ihrer Gesamtheit den Unternehmensprozess abbilden (Binner, 2011, S. 132). REFA definiert weiter, dass Arbeitssysteme unterschiedliche Größen sowie Zuordnungsmöglichkeiten haben können. Die kleinste Einheit ist dabei das Mikro-Arbeitssystem ‚Arbeitsplatz‘ und ein Makro-Arbeitssystem beispielsweise Abteilungen oder der gesamte Betrieb, wodurch dies eine hierarchische Darstellung ermöglicht (REFA, 1984, S. 96 f.). Bezüglich der Zuordnung können Arbeitssysteme hintereinander folgen, parallel zueinander stehen, sich überschneiden oder hierarchisch ineinander aufgebaut sein (ebd., S. 97 f.). „Ihr Zusammenspiel bildet in ihrer Gesamtheit den Unternehmensprozess ab, die Realisierung eines bestimmten Kundenauftrages erfolgt über das geregelte Zusammenspiel unterschiedlicher Arbeitssysteme meist über mehrere Betriebsbereiche hinweg“ (Binner, 2011, S. 132).

In diesem Zusammenhang wird von REFA ein Sammelsurium an Modellierungs- und Darstellungsmethoden präsentiert, welche unterschiedlichen Analyseschwerpunkten – prozessorientiert, ablauforientiert, aufbauorientiert, mitarbeiterorientiert, datenorientiert, informationsbedarfsorientiert, wertorientiert, kommunikationsorientiert, objektorientiert, aufgabenorientiert – folgen (ebd., S. 107). „Modelle selber sind die zweckgerechte Abbildung eines realen Systems oder Systemausschnittes, welche besonders die in der, gegebenen Zusammenhang für eine Problemlösung als wichtig erachteten Aspekte unter Vernachlässigung anderer, als weniger wichtig angesehene Gesichtspunkte darstellt“ (ebd.). Zwei zentrale Ansätze (Abbildung 27) stellen hierbei die ‚bisherige‘ aufgabenbezogene Funktionsorientierung und ‚zukünftige‘ ablaufbezogene Prozessorientierung dar. Im Vordergrund der funktionsorientierten Darstellung steht die arbeitssystembezogene Optimierung, welche damit den Arbeitsplatz bzw. die Abteilungen betreffend umgesetzt wird (ebd., S. 28). Innerhalb der prozessorientierten Darstellung liegt der Fokus auf dem ‚Gesamtoptimum der gesamten Wertschöpfungskette‘ (ebd.). Beide Darstellungen stehen in wechselseitiger Beziehung, denn „das Festlegen des Ablaufes sowie die Koordination ist nur unter Bezug auf die aufbauorganisatorischen Vorgaben möglich [...]“ (ebd., S. 591).

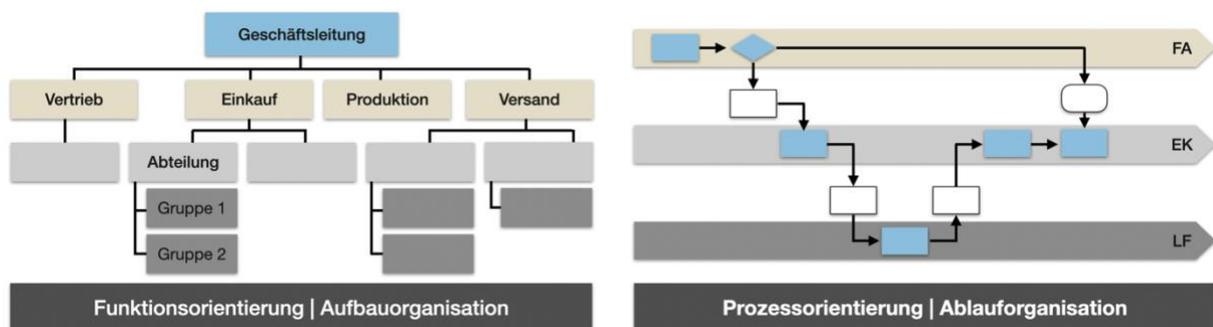


Abbildung 27: Schematische Darstellung der zentralen Modellierungsmethoden Funktions- und Prozessorientierung (vgl. Abbildung 1–16 in Binner, 2011, S. 29)

Innerhalb der Anwendung von Methoden bzw. Ansätzen bilden Prinzipien den Handlungsrahmen für grundsätzliche Vorgehensweisen (ebd., S. 108). Prinzipien behandeln dabei konkrete Regeln nach Vorschriften und sind anwendungsneutral (ebd.). REFA konkretisiert hierzu folgende Prinzipien:

- Abstraktion: Erlaubt Nutzung für Aufgaben mit unterschiedlichem Informationsbedarf.
- Hierarchische Strukturierung: Ermöglicht Durchgängigkeit der Methodenanwendung über alle Ebenen.
- Modularität: Erlaubt Wiederverwendung von Modellteilen und erhöht damit die Produktivität.
- Lebenszyklusdarstellung: Ermöglicht eine strukturierte Erstellung und Erweiterung der Modelle.
- Modellschichten: Reduzierung der Komplexität in der Modellerstellung und -nutzung.
- Systemoffenheit: Gestattet, Modelle in heterogenen Systemen zu erstellen, zu nutzen und zu pflegen.

Zusammengefasst zeigt sich, dass die ‚Systematisierung über‘ und ‚Verwendung von‘ Arbeitssystemen mit deren Bestandteilen umfangreiche Analyse- und Betrachtungsperspektiven sowie Darstellungs- und Modellierungsmöglichkeiten eröffnet. Zentral ist dabei, dass je nach Analyseschwerpunkt unterschiedliche Fokussierungen sowie Methoden mit entsprechenden Prinzipien folgen. Das Vorgehen bzw. die Ermittlung brauchbarer und reproduzierbarer Daten müssen unmittelbar berücksichtigt werden – das bedeutet, dass die zugrundeliegenden Arbeitsbedingungen bekannt sind, die bestimmten statistischen Anforderungen, bezogen auf den Verwendungszweck genügen sowie der zugrundeliegende Arbeitsablauf beschrieben sein muss (REFA, 1992, S. 13). Im Zusammenhang mit dem Arbeitsablauf in Arbeitssystemen konstatiert REFA: „Im Arbeitsablauf wird erfaßt, wo (zum Beispiel in welcher Abteilung und an welchem Arbeitsplatz), wann (in welcher zeitlichen Aufeinanderfolge) und womit (zum Beispiel mit welchen Menschen und Betriebsmitteln), die Eingabe (zum Beispiel ein Arbeitsgegenstand) gemäß der Arbeitsaufgabe verändert oder verwendet wird. Zur Beschreibung des Ablaufs ist es erforderlich, ihn in Ablaufschritte zu zerlegen“ (REFA, 1984, S. 100).

2.3.4 Arbeitsablaufplan

Nicht zuletzt aufgrund der Notwendigkeit von brauchbaren und reproduzierbaren Daten in REFA, sondern auch wegen der handlungsbezogenen Wissensdiagnostik kommt der Arbeitsablaufplanung bzw. dem Instrument des Arbeitsablaufplans eine bedeutsame Rolle zu und ist dadurch für die vorliegende Forschungsarbeit von hoher Relevanz.

Die Industrie 4.0 setzt bereits in Bezug auf die Digitalisierung der Wertschöpfung entlang von ‚Manufacturing-Execution-Systemen‘ (kurz: MES) einen Arbeitsplan als lückenlosen Workflow für den gesamten Fertigungsprozess voraus (Brauckmann, 2019, S. 246). Der Arbeitsplan ist dabei ein altbekanntes, elaboriertes Instrument und stellt in der Fertigung und Montage neben Zeichnungen und Stücklisten ein wichtiges Dokument dar. Die Dokumentation ist hierbei eine Strukturierung der Herstellungsaufgabe für die Arbeitsverteilung bzw. -steuerung und beinhaltet zudem die Festlegung der Ausführungszeiten je Einheit für Termin- und Kapazitätsplanung (Eversheim, 1989, S. 11). Je nach Detaillierungsgrad der Dokumentation wird eine Datenbasis geschaffen, die beispielsweise für Kalkulation, Investitionsplanung, Wirtschaftlichkeitsberechnungen, Verfahrensvergleiche usw. verwendet werden kann (ebd., S. 13). Der Aufbau eines Arbeitsplans (Tabelle 15) gliedert sich häufig in allgemeine, sachabhängige sowie arbeitsgangabhängige Angaben (Eversheim, 1995, S. 80).

Tabelle 15: Aufbau und Daten eines Arbeitsablaufplanes (vgl. Eversheim, 1995, S. 80)

Allgemeine Angaben	Sachabhängige Angaben	Arbeitsvorgangsabhängige Angaben
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Identifizierung ▪ Art des Arbeitsplanes ▪ Stückzahlbereich ▪ Aktualitätsangaben ▪ Ursprungsangaben ▪ Angaben zu Umfang und Vollständigkeit des Basisarbeitsplanes ▪ Sachbearbeitungsbereich 	<p>Bezogen auf den Fertigungszustand der zu bearbeitenden Sache:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Ident.-Nr. ▪ Zeichnungs-Nr. ▪ Benennung ▪ Klassifizierungs-Nr. ▪ Teilefamilien-Nr. (werkstückbezogen) <p>Bezogen auf den Ausgangszustand der zu bearbeitenden Sache:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Ident-Nr. Ausgangsmaterial bzw. -teil ▪ Klassifizierungs-Nr. Ausgangsmaterial bzw. -teil ▪ Werkstoff ▪ Benennung ▪ Basismenge und Mengeneinheit ▪ Rohmaße und Rohgewicht 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Arbeitsvorgangs-Nr. ▪ Beschreibung zum Arbeitsvorgang ▪ Kennzeichnung des Arbeitsplatzes ▪ Basis (Stückzahl gleichzeitiger Bearbeitung) ▪ Verknüpfung ▪ Lohngruppe ▪ Lohnart ▪ Verfahren der Vorgabezeitbestimmung ▪ Zeiteinheit ▪ Rüstzeit t_r ▪ Rüstzeit bei Teilefamilienfertigung ▪ Zeit je Einheit t_e ▪ Bedienungsverhältnis ▪ Überlappung, Splittung (zeitlich, mengenmäßig) ▪ Kennzeichnung von Fertigungshilfsmitteln ▪ Teilefamilien-Nr. (arbeitsvorgangsbezogen) ▪ Ein- und Aussteuerhinweise ▪ Stückzahlvariator

Der Plan kann zudem „Informationen über die Art, die technologische Reihenfolge der Aktionen eines jeden Auftrages/Teilauftrags, deren Zeitbedarf (Kapazitätsbedarf ohne Periodenzuordnung, gemessen in Zeiteinheiten) und die Art der benötigten Kapazitäten (Maschinen, Werkzeuge, Arbeitskräfte)“ enthalten (Gabler, 1988, S. 314). Zusätzlich können Angaben zu Materialqualitäten, Ausschussvorgaben, Richtzeiten, Transporthinweisen usw. gegeben werden (ebd.). Die benötigten bzw. relevanten Aspekte werden entsprechend über den Arbeitsplan in Form einer Tabelle (Tabelle 16) zusammengetragen.

Tabelle 16: Exemplarischer Aufbau mit Daten zum Arbeitsplan (vgl. Cobo Cards Pool, 2010)

Blatt:	Datum:		Auftragsnummer:		Arbeitsplan		
	Bearbeiter:						
Stückzahl:	Bereich:	Benennung:			Zeichnungsnummer:		
Werkstoff		Rohform und -abmessungen:			Rohgew.:	Fertiggew.:	
AV/G Nr.	Arbeitsvorgangs- beschreibung	Kosten- stelle	Lohn- gruppe	Maschinen- gruppe	Fertigungs- hilfsmittel	t_r [min]	t_e [min]

3 Konkretisierung der Forschungsarbeit

Mit den theoretischen Leitlinien können die übergeordnete Forschungsfrage bzw. das übergeordnete Forschungsziel in konkrete Forschungsfragen (Abschnitt 3.1) präzisiert sowie die Theorien integrativ zu einem Arbeitsmodell (Abschnitt 3.2) zusammengeführt werden.

3.1 Forschungsfragen und Forschungsziele

Die übergeordnete Zielperspektive, Kompetenzanforderungen im Bereich der Additiven Fertigung im Bauwesen bereits in der Entwicklung der Technologien zu erschließen, kann ausgehend von den kompetenztheoretischen Hintergründen aus Kapitel 2.1 konkretisiert werden (Abbildung 28). Nach dem technikdidaktischen Kompetenzmodell (Abschnitt 2.1.1) und der Unterscheidung in fachlich-methodische und überfachliche Kompetenzen ergeben sich hieraus zwei spezifische Forschungsstränge. Der technikdidaktische Ansatz stellt hierzu ein tragfähiges, theoretisch und empirisch fundiertes Kompetenzmodell zu fachlich-methodischen Kompetenzen mit handlungsbezogener Wissensdiagnostik bereit, welche über den Zugang von Handhabungs- und Problemlöseprozessen erschlossen werden. Im Bereich überfachlicher Kompetenzen zeigt das technikdidaktische Kompetenzmodell eine schlüssige Theorie, jedoch Weiterentwicklungspotenzial bzw. Forschungsbedarfe auf. Die Problemlöseprozesse eröffnen dabei mit den Tätigkeiten komplexer Analysen sowie Fehler- und Schwachstellenbeseitigung die Anschlussfähigkeit zur Informationsverarbeitung als Teilfacette überfachlicher Kompetenzen. Da fachlich-methodische Kompetenzen im Kern beruflich-technischer Arbeit stehen, können sich die überfachlichen Kompetenzanforderungen unmittelbar auf die fachlich-methodischen Kompetenzanforderungen sowie auf die Teilfacette der Informationsverarbeitung beziehen und diese sowohl aufgreifen als auch anreichern.

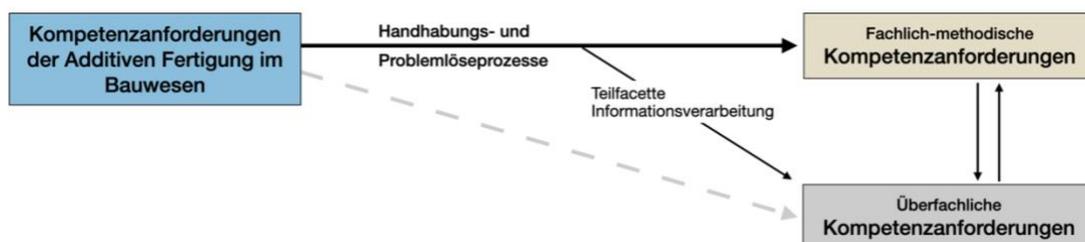


Abbildung 28: Konkretisierung der Forschungsstränge und Fokussierung der Zielstellung zur Forschungsarbeit

Ausgehend von den dargestellten Bezügen steht der Forschungsstrang zu fachlich-methodischen Kompetenzanforderungen im Zentrum der Forschungsarbeit. Mit dieser Präzisierung des Forschungsbereiches und der damit verbundenen Fokussierung auf die Handhabungs- und Problemlöseprozesse geht dies mit der Konkretisierung einer ersten Forschungsfrage einher:

- 1) Wie stellen sich die Handhabungs- und Problemlöseprozesse im Kontext von AMC-Umgebungen dar?

Mit den (Analyse-)Ansätzen technischer Prozesse – insbesondere mit der FMEA und dem Arbeitsablaufplan – kann eine empirische Datenbasis umgesetzt werden, die mit der Adaption

des Rekonstruktionsansatzes fachlich-methodische Kompetenzen analysiert bzw. fachlich-methodische Kompetenzprofile generiert. Hierzu schießt die zweite Forschungsfrage an:

- 2) Wie stellen sich fachlich-methodische Kompetenzprofile von Menschen in AMC-Umgebungen dar?

Die Problemlöseprozesse aus Forschungsfrage 1 können zudem für die Erschließung der Teilfacette zur Informationsverarbeitung genutzt werden. Über die Modelle nach Hube (2005) und Kuhlen und Semar (2023) wird die Thematik zu Wissensarbeit und Informationsverarbeitung adaptiert und kann hierbei erste Anhaltspunkte und Erkenntnisse liefern. Für den vorliegenden Kontext bedeutet dies, dass die Fachkraft Wissensarbeit leisten muss, wenn ihr eigenes Wissen und ihre Erfahrungen im Arbeitsvorgang (Referenzhandlungsfeld) nicht ausreichen, um fachgerecht zu agieren (faktisches Handlungsfeld). Dabei können die Fehler, die unmittelbar im Fertigungsprozess auftreten, eine potenziell mögliche Unwissenheit hervorrufen, wodurch die Fachkraft Informationen generiert und für das vorliegende Bezugsproblem nutzbar macht, um die Handlungsfähigkeit im Fertigungsprozess zu sichern. Diese Bezüge leiten die dritte Forschungsfrage her:

- 3) Wie stellt sich die Informationsgenerierung und -nutzbarmachung zur Sicherung einer operativen Handlungsfähigkeit in AMC-Umgebungen dar?

Im Zusammenhang mit den Forschungsfragen werden zwei Teilziele konkretisiert. Teilziel 1 ist dabei ein theorie-integrativer, wissenschaftlich fundierter Ansatz, der die kompetenzrelevanten Gegebenheiten und Zusammenhänge in AMC-Umgebungen abgreift und die Generierung fachlich-methodischer Kompetenzprofile ermöglicht. Hierbei wird die Grundlagenforschung im Bereich fachlich-methodischer Kompetenzen und deren Diagnostik ausgehend von den theoretischen Leitlinien domänen- und technologiespezifisch erweitert und mit der Teilfacette zur Informationsverarbeitung angereichert. Das daran anschließende Teilziel 2 bezieht sich auf die Umsetzung bzw. Anwendbarkeit des Ansatzes in konkreten, exemplarischen AMC-Umgebungen, die sich aktuell in Entwicklung befinden. Dadurch werden erste Kompetenzprofile generiert. Mit der Forschungsarbeit wird ein eigenständiges Segment an kontextspezifischer Grundlagenforschung erschlossen, welches als empirische Basis für aufbauende Entwicklungs- und Evaluationsstudien genutzt werden kann.

3.2 Theorie-Integration – Arbeitsmodelle

Um die AMC-spezifischen Gegebenheiten in ihrer Komplexität zu explorieren und für die Generierung von Kompetenzprofilen nutzbar zu machen, gilt es, die theoretischen Leitlinien integrativ, schlüssig und konsistent zusammenzuführen. Hierfür sind sukzessive adäquate Transformationsschritte zu einem theorie-integrativen Arbeitsmodell erforderlich. Dieses gliedert sich in einen ersten Teil zur Strukturierung und Systematisierung der AMC-Prozesse (Abschnitt 3.2.1) und in einen zweiten Teil – als dessen Erweiterung – zur Erschließung der Informationsgenerierung und -nutzbarmachung (Abschnitt 3.2.2).

3.2.1 Teil 1: Strukturierung und Systematisierung der AMC-Prozesse

Ziel des Arbeitsmodells ist es, die vorliegenden AMC-Prozesse mit ihren vielschichtigen Zusammenhängen wissenschaftlich fundiert abzugreifen, zu strukturieren und zu systematisieren, um eine ausreichende Datenbasis für eine handlungsbezogene Wissensdiagnostik zu schaffen. Das bedeutet, dass alle konzeptionellen Transformationsschritte in diesem Abschnitt sowie die hierin umgesetzte Tiefe der verwendeten Theorien und Ansätze unmittelbar vor dem Hintergrund eines kompetenzdiagnostischen Zugangs gedacht und integriert werden. Konzeptionelle Rahmung und Ausgangspunkt des Arbeitsmodells (Abbildung 29) bilden der MTO-Ansatz. Mit den Transformationsschritten werden 1) das Analyseelement ‚Unternehmen‘ des MTO-Konzepts auf die Rahmenbedingungen eines AMC-Verfahrens bezogen; 2) die Ebene der Organisationseinheit sowie der darin enthaltene Auftragsdurchlauf durch die Prozesskette des qualitätsgesicherten Additiven Fertigungsprozesses nach DIN SPEC 17071:2019 vorstrukturiert; 3) das Analyseelement der Arbeitssysteme geschärft und der Auftragsdurchlauf über mehrere Ebenen hinweg systematisiert; 4) daran die Schritte zu FMEA adaptiert sowie 5) der Arbeitsablaufplan angelehnt an den Rekonstruktionsansatz eingebettet.

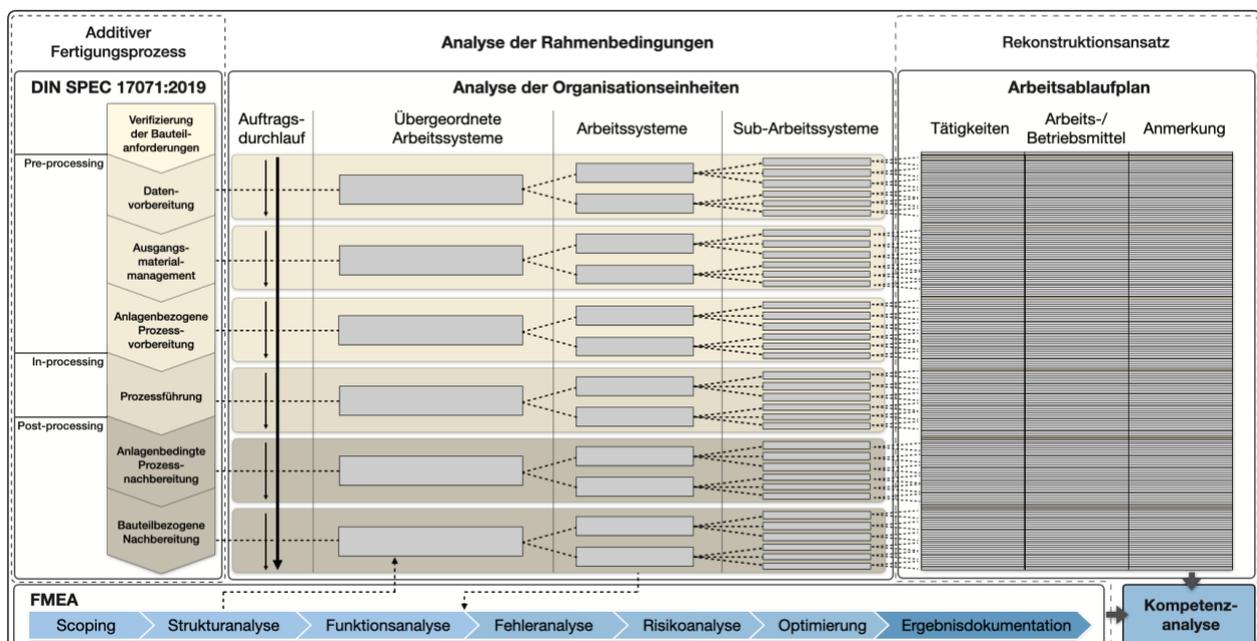


Abbildung 29: Theorie-integratives Arbeitsmodell zur Strukturierung und Systematisierung der AMC-Prozesse

Transformationsschritt 1:

Wie die Studie nach Schüpbach und Zölch (2004) zeigt, lässt sich die MTO-Analyse „in den konzeptuellen und methodischen Grundzügen mit Anpassungen auch auf Krankenhäuser, Schulen, Verwaltungen etc. übertragen“ (Schüpbach & Zölch, 2004, S. 208). Mit dem ersten Transformationsschritt wird daher die ‚Analyse auf Ebene des Unternehmens‘ des MTO-Ansatzes auf ein spezifisches AMC-Verfahren adaptiert, um hier ebenfalls zunächst die zentralen Voraussetzungen und Rahmenbedingungen für die weiteren Analysen zu erschließen. Hierbei werden insbesondere die Aspekte Ziele, Strategie, Organisation, Bauteile, Produktionsbedingungen, Personalstruktur sowie Technikeinsatz erfasst und dokumentiert. Gegenstände wie das Innovationsverhalten, Lohnsysteme, Arbeitszeitmodelle, Mitwirkungsrechte etc. sind für den weiteren Verlauf irrelevant und finden daher keine Berücksichtigung.

Transformationsschritt 2:

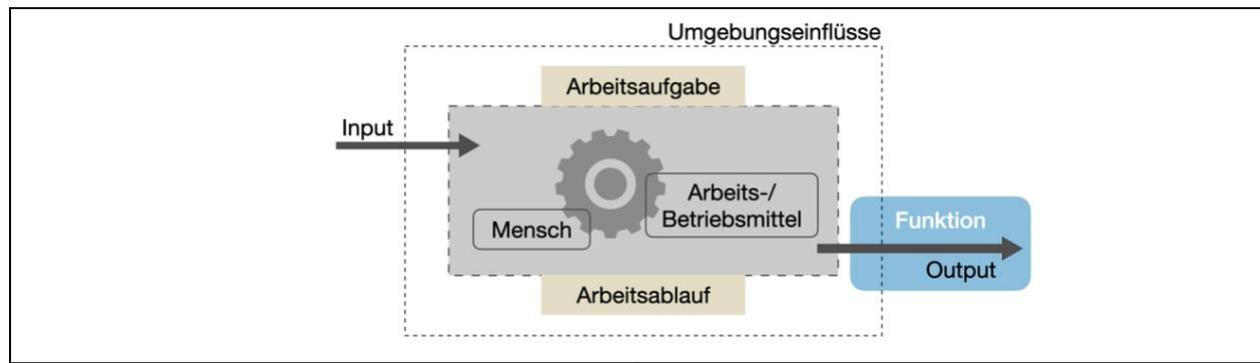
Über Transformationsschritt 2 erfolgt die Integration des qualitätsgesicherten Fertigungsprozesses der DIN SPEC 17071:2019-12. Da der MTO-Ansatz in der nächsttieferen Ebene von Organisationseinheiten ausgeht, welche sich in Formen der Arbeitsteilung bzw. der funktionalen Trennung sowie deren Primäraufgabe unterscheiden, werden die ‚relevanten Bereiche‘ der DIN SPEC 17071:2019-12 – Datenvorbereitung, Ausgangsmaterialmanagement, Anlagenbezogene Prozessvorbereitung, Prozessführung, Anlagenbedingte Prozessnachbereitung, Bauteilbezogene Nachbereitung – als Organisationseinheiten übernommen. Das Analyseelement ‚Auftragsdurchlauf‘ des MTO-Ansatzes bezieht sich damit einerseits auf den in der DIN beschriebenen gesamten AM-Fertigungsprozess sowie andererseits auf die darin enthaltenen Teilprozesse/-durchläufe innerhalb der Organisationseinheiten. Aufgrund der Spezifizierungen in den vertiefenden Elementen der DIN (‚je Fertigungsverfahren‘) wird in diesem Fall von einer feingliedrigeren Strukturierung abgesehen und keine weitere Vorstrukturierung vorgenommen.

Transformationsschritt 3:

Da das dritte Analyseelement ‚Arbeitssystem‘ aus dem MTO-Ansatz eine inhaltlich-theoretische Kohärenz zur DIN EN ISO 6385 sowie zu REFA aufweist und die Arbeitssysteme für die weiteren Transformationsschritte 4 und 5 von großer Bedeutung sind, erfolgt über Transformationsschritt 3 eine Anreicherung und Schärfung der Arbeitssysteme. Das Arbeitssystem zum Arbeitsmodell und dessen Komponenten bzw. Systemelemente (Tabelle 17) werden präzisiert sowie definiert als

System, welches das Zusammenwirken des Menschen mit einem Arbeits-/Betriebs- und/oder Hilfsmittel als Transformationsprozess vom Input zum Output beschreibt, um die Funktion des Systems zu erfüllen. Es charakterisiert sich zudem über einen Arbeitsauftrag mit einem Arbeitsablauf, welcher unter bestimmten Umgebungsbedingungen ausgeführt wird.

Tabelle 17: Präzisierung der Komponenten bzw. Systemelemente eines Arbeitssystems zum Arbeitsmodell



Komponente bzw. Systemelement	Beschreibung
Arbeitsaufgabe	Bezeichnung bzw. Benennung des Arbeitssystems über Substantiv und Verb. Das Substantiv bezieht sich auf den Output des Arbeitssystems. Beispiel: „Basisschicht erstellen“
Input	Alle Ressourcen, die für den Transformationsprozess benötigt werden.
Mensch	Experten bzw. Fachkräfte, die die Arbeitsaufgabe bzw. den Arbeitsablauf ausführen.
Arbeits-/Betriebsmittel	Maschinen(-teile) oder Werkzeuge, die zur Ausführung des Arbeitssystems zwingend erforderlich sind und zu einer aktiven Veränderung im Transformationsprozess beitragen.
Hilfsmittel	Geräte oder Gegenstände, die zur Ausführung des Arbeitssystems nicht zwingend erforderlich sind und lediglich zur einfacheren Handhabung im Arbeitsablauf beitragen.
Arbeitsablauf	Tätigkeitsabfolge des Transformationsprozesses vom Input zum Output.
Output	Ergebnis bzw. Erzeugnis des Systems, welches über den Arbeitsablauf bzw. durch den Transformationsprozess erstellt wurde.
Funktion	Eigenschaften des Outputs bzw. Anforderungen an den Output.
Umgebungseinflüsse	Externe Einflüsse auf das Arbeitssystem aus der Umgebung und/ oder Versorgung.

Zudem ist die hierarchische Darstellung von Arbeitssystemen nach REFA vorgesehen und wird auf drei Ebenen umgesetzt, damit ein Arbeitssystembaum entsteht. Das ‚Makro-Arbeitssystem‘ (im Arbeitsmodell als „Übergeordnetes Arbeitssystem“ bezeichnet) greift hierbei die ‚relevanten Bereiche‘ der DIN SPEC 17071:2019-12 – die Organisationseinheiten nach MTO – auf. Die darauffolgenden Ebenen (im Arbeitsmodell als Arbeitssystem und Sub-Arbeitssystem bezeichnet) stellen jeweils Teilsysteme dar. Dies führt zur Systematisierung des gesamten AMC-Fertigungsprozesses durch die Arbeitssysteme und spiegelt sich im entsprechenden Arbeitssystembaum wider.

Die Verwendung der ‚relevanten Bereiche‘ gemäß DIN SPEC 17071:2019-12 als Organisationseinheiten und im Arbeitsmodell als übergeordnete Arbeitssysteme ist insofern schlüssig, da sich sowohl die Organisationseinheiten (siehe Abschnitt 2.3.2) als auch die Arbeitssysteme (siehe Abschnitt 2.3.3) nach deren Primäraufgaben trennen bzw. abgrenzen.

Transformationsschritt 4:

Mit Transformationsschritt 4 erfolgt die Adaption der FMEA nach AIAG & VDA und damit die Integration einer ‚arbeitssystem-basierten Prozess-FMEA‘ in das Arbeitsmodell (Abbildung 29). Schnittstellen hierfür sind die Strukturanalyse aus FMEA-Schritt 2 und der Arbeitssystembaum aus Transformationsschritt 3. Für die schlüssige Integration folgen Implikationen zur 1) Zielsetzung, 2) Systemhierarchie sowie zum 3) Vorgehen:

- 1) Da der AMC-Fertigungsprozess als Arbeitssystembaum vorliegt, werden die Zielsetzungen der System-FMEA und der Prozess-FMEA zusammengeführt:
Ziel der ‚arbeitssystem-basierten Prozess-FMEA‘ ist es, ein reibungsloses Zusammenspiel der Prozesseinflüsse ‚Mensch‘, ‚Maschine‘, ‚Material‘, ‚Methode‘ und ‚Mittwelt‘ für die Robustheit der Arbeitssysteme und somit der AMC-Fertigungsprozesse abzusichern und dabei die Auswirkungen auf den Prozess sowie die Einflüsse auf das Bauteil zu erschließen.
- 2) Entsprechend der Zielsetzungen folgt ebenfalls die Zusammenführung der Systemhierarchien: Die Systemhierarchie zur ‚arbeitssystem-basierten Prozess-FMEA‘ (Tabelle 18) ist hierbei so ausgerichtet, dass die Auswirkungen der Fehler (Folgen) auf die Bauteileigenschaften/-anforderungen sowie auf den Prozess erarbeitet werden. Alle möglichen Fehler (Fehlerart) befinden sich demnach im Arbeitssystem bzw. Prozessschritt und deren Ursache im untergeordneten System, dem Sub-Arbeitssystem bzw. einer Komponente des Sub-Arbeitssystems, welches in einer Prozess-FMEA den 5M-Prozesseinflüssen entspricht.
- 3) Vorgehen: Bezüglich des ersten FMEA-Schrittes zur Planung und Vorbereitung wird der 5Z-Projektplan in die ‚Analyse auf Ebene des AMC-Verfahrens‘ (Transformationsschritt 1) aufgenommen. Das Ziel bzw. der Zweck der FMEAs (aus Punkt 1) bleibt über alle AMC-Verfahren hinweg gleich. Die Dokumentationen der ‚Analyse auf Ebene des AMC-Verfahrens‘ werden daher mit dem FMEA-Ziel und -Zweck, dem FMEA-Werkzeug, der Aufgabenzuweisung, der Teamzusammensetzung sowie der Abstimmung zum FMEA-Zeitplan ergänzt. Der zweite FMEA-Schritt zur Strukturanalyse führt zur Erstellung des

Arbeitssystembaums. Zum dritten Schritt – Funktionsanalyse – werden bereits im Vorfeld die Bauteileigenschaften mit Funktionen zur Bauteilgeometrie und zu Materialeigenschaften sowie die Prozessauswirkung mit Funktionen zum Prozessdurchlauf, zur Prozesspause, zum Prozessabbruch und zur Auswirkung auf Folgeprozesse vorstrukturiert. Die Erschließung der darauffolgenden Funktionen zu den Arbeitssystemen und den 5M-Prozesseinflüssen folgt dem standardisierten FMEA-Vorgehen nach AIAG & VDA 2019. Bezüglich Schritt 4 und 5 zur FMEA werden die Fehlfunktionen der Bauteileigenschaften mit deren Bewertung zur Bedeutung vorgegeben. Die weiteren Fehlfunktionen, das Fehlernetz sowie die Vermeidungs- und Entdeckungsmaßnahmen mit Risikobewertung werden zusammen mit den Experten erarbeitet. Da die Umsetzungstiefe der FMEA bzgl. der Kompetenzanforderung erreicht ist, können die Schritte 6 und 7 optional als Benefit für den Experten weitergeführt werden. Das adaptierte und vollständige Vorgehen wird in einem gesonderten Handbuch mit Risikobewertung (siehe Anhang) manifestiert und bei der Umsetzung verwendet.

Tabelle 18: Adaptierte Systemhierarchie zur ‚arbeitssystem-basierten Prozess-FMEA‘

FMEA-Arten	Bauteileigenschaften/-anforderungen	Arbeits-system	Sub-Arbeitssystem	Komponenten- / (System-) Element	(Produkt-) Merkmal	
System- / Komponenten- (Design-)FMEA	Folgen	Fehler	Ursachen			
	Folgen	Folgen	Fehler	Ursachen		
	Folgen	(Folgen)	Folgen	Fehler	Ursachen	
Prozess- FMEA				Prozess	Prozessschritt	Prozesseinflüsse
	Folgen	Folgen	Folgen	Folgen	Fehler	Ursachen

Bezüglich der Integration zur ‚arbeitssystem-basierten Prozess-FMEA‘ ergeben sich konzeptionelle Schlüssigkeiten in den Theorien:

- Das MTO-Konzept benennt als Gegenstände zur Analyse von Arbeitssystemen ‚Schwankungen, Störungen und Hauptprobleme‘.
- Die Definition zum Arbeitssystem nach DIN EN ISO 6385 benennt eine ‚Funktion des Systems‘, welche für die Funktionsanalyse der FMEA verwendet werden kann.
- Die 5M’s der Prozess-FMEA spiegeln sich in Komponenten des Arbeitssystems wider: Mensch ist in beiden gleich; Maschine über die Arbeits-/Betriebsmittel; Materialien über die Ressourcen des Inputs; Mitwelt über die Umgebungseinflüsse sowie die Methode entlang des Arbeitsablaufs bzw. dessen Vorgaben zur Ausführung.

Transformationsschritt 5:

Der letzte Transformationsschritt 5 bettet den Arbeitsablauf- bzw. Fertigungsplan (Abschnitt 2.3.4 sowie insbesondere Abschnitt 2.1.3 aus dem Rekonstruktionsansatz) in das Sub-Arbeitssystem ein und präzisiert die darin enthaltenen Daten. Unter genauerer Betrachtung des Arbeitsablaufs

entlang der unterschiedlichen Arbeitssystemebenen (Transformationsschritt 3) ergibt sich folgende Logik (Abbildung 30):

- Die Abfolge der Arbeitssysteme stellt den Arbeitsablauf der übergeordneten Arbeitssysteme dar.
- Die Abfolge der Sub-Arbeitssysteme beschreibt wiederum den Arbeitsablauf der Arbeitssysteme.
- Die Abfolge einzelner Tätigkeiten bzw. Arbeitsschritte spiegelt den Arbeitsablauf der Sub-Arbeitssysteme wider.

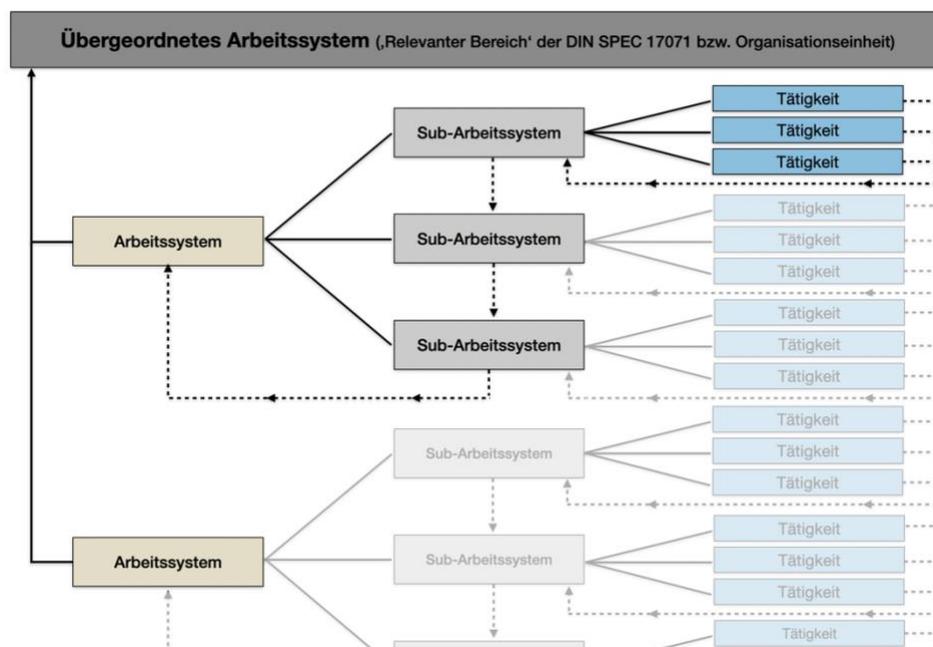


Abbildung 30: Logik zum Arbeitsablauf innerhalb der Arbeitssystemebenen

Ausgehend von dieser Logik ist es schlüssig, den Arbeitsablaufplan zur Explikation der Tätigkeiten bzw. Arbeitsschritte zu verwenden und damit auf Sub-Arbeitssystemebene zu integrieren. Vor dem Hintergrund des diagnostischen Zugangs über den Rekonstruktionsansatz ist hierbei die Explikation der 1) Tätigkeiten mit den zugehörigen 2) Arbeits-/Betriebs- und Hilfsmitteln sowie 3) ergänzenden Anmerkungen ausreichend.

- 1) Die Tätigkeiten werden wie folgt expliziert:

Die Tätigkeit wird über ein Verb (nach Duden auch: „Tätigkeitswort“) in Verbindung mit einem Substantiv beschrieben. Das Verb definiert die Art der Tätigkeit, das Substantiv den Umfang. Das Substantiv der Tätigkeit bezieht sich auf den kleinstmöglichen physischen Mehrwert im Prozess. Die Tätigkeiten können in Haupt- und vor- bzw. nachbereitende Tätigkeiten differenziert werden. Haupttätigkeiten sind auf die Erstellung des Outputs ausgerichtet, vor- bzw. nachbereitende Tätigkeiten hingegen beziehen sich auf das Einrichten und Aufräumen des Arbeitsplatzes.

Ein Beispiel hierfür ist, dass die Tätigkeit ‚Ausgangsmaterialien wiegen‘ im Grunde genommen die gleiche Tätigkeit wie ‚Methylcellulose wiegen‘ ist, sich der Umfang des Arbeitsschrittes jedoch deutlich unterscheidet. Der kleinstmögliche physische Mehrwert ist demnach das ‚Methylcellulose wiegen‘ und wird für die Explikation der Tätigkeiten verwendet. Die Substantive beziehen sich zumeist auf Bauteile, Materialien (Sand, Zement etc.), Erzeugnisse (Parameter, Sketch, Dateien etc.) und Arbeits-/Betriebs- oder Hilfsmittel (Maschinenelemente, Werkzeuge etc.).

- 2) Die Arbeits-/Betriebs- und Hilfsmittel des Arbeitsablaufplans wurden bereits im Rahmen der Komponenten des Arbeitssystems präzisiert.
- 3) Die Anmerkungen sind verständliche, nachvollziehbare Kommentierungen zu den Tätigkeiten bezüglich Auffälligkeiten und zur Erläuterung erweiterter Zusammenhänge oder Verständnisse.

3.2.2 Teil 2: Informationsgenerierung und -nutzbarmachung

Nachdem das Arbeitsmodell zur prozessorientierten Strukturierung und Systematisierung auf die Handhabungs- und Problemlöseprozesse und damit auf die Diagnostik fachlich-methodischer Kompetenz ausgerichtet ist, wird eine Erweiterung des Arbeitsmodells bezüglich der Teilfacette zur Informationsverarbeitung angeschlossen. Ziel des erweiterten Arbeitsmodells (Abbildung 31) ist es, die im Kontext von Wissensarbeit erfolgte Informationsgenerierung und -nutzbarmachung zur Sicherung der operativen Handlungsfähigkeit zu konkretisieren. Bezugstheorien der folgenden Transformationsschritte 6 und 7 bilden dabei die Vierfeldertafel mit Neuartigkeit und Komplexität der Arbeit nach Hube (2005) sowie das objektbezogene und verfahrens-/prozessorientierte Modell zur Be- und Verarbeitung von Wissensobjekten nach Kühlen und Semar (2023).

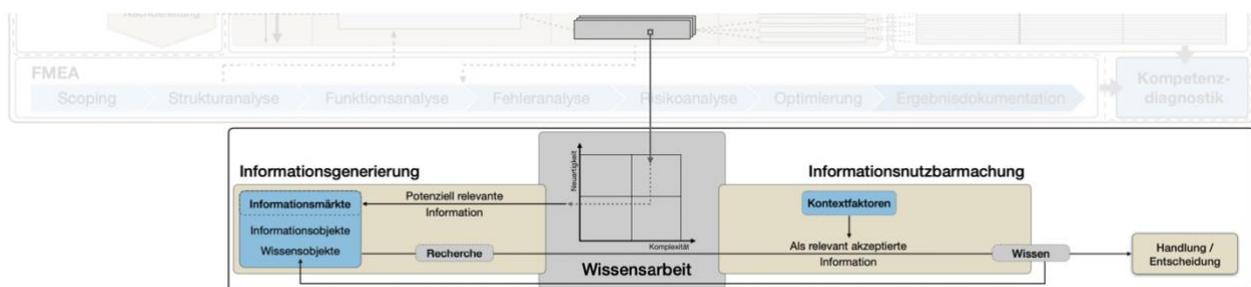


Abbildung 31: Erweitertes Arbeitsmodell 1 für die Erschließung der Informationsgenerierung und -nutzbarmachung (zur Sicherung der operativen Handlungsfähigkeit)

Transformationsschritt 6:

Mit Transformationsschritt 6 werden die Arten von Wissensarbeit über die Vierfeldertafel (vgl. Abbildung 9, Kapitel 2.1.2.1) nach Hube (2005) adaptiert und auf die Arbeitssysteme des additiven Fertigungsprozesses bezogen, um den ‚Grad an potenziell enthaltener Wissensarbeit‘ festzustellen. Das bedeutet, dass die Neuartigkeit der Arbeit im Arbeitssystem der Komplexität der Arbeit im Arbeitssystem gegenübergestellt wird. Da sich die AM-Fertigungsprozesse durch hohe Gestaltungsfreiheit und individuelle Produkte auszeichnen, wird die Neuartigkeit der Arbeit

mit der Individualität angereichert bzw. erweitert. Die Komplexität der Arbeit berücksichtigt die potenziell auftretenden Probleme im Arbeitssystem. Um Konsistenz zu schaffen, ist es an dieser Stelle wichtig, dass das Untersuchungsgebiet der Fehlerart in der FMEA auf der Arbeitssystemebene liegt und sich daher auch die Wissensarbeit auf die jeweiligen Arbeitssysteme beziehen muss.

Transformationsschritt 7:

Mit Transformationsschritt 7 erfolgt die Adaption des Modells zur Be- und Verarbeitung von Wissensobjekten (vgl. Abbildung 12, Abschnitt 2.1.2.3) nach Kuhlen und Semar (2023). Ziel ist es, das Modell auf die Informationsgenerierung und -nutzbarmachung zur Sicherung der operativen Handlungsfähigkeit in AMC-Umgebungen auszurichten. Das adaptierte Modell (Abbildung 32) wird demnach vor dem Hintergrund der Wissensarbeit betrachtet: Die Fachkraft, die im additiven Fertigungsprozess arbeitet – also den Arbeitsauftrag des Arbeitssystems ausführt –, wird mit einem bestimmten Fehler (Bezugsproblem) konfrontiert. Das Referenzhandlungsfeld bietet eine potenziell relevante Information zur Fehlerursache. Um die tatsächliche Ursache des Fehlers zu ermitteln (Informationsgenerierung, orange Pfeile), wird innerhalb der Informationsmärkte recherchiert. Über die Kontextfaktoren wird aus der potenziell relevanten Information eine relevant akzeptierte Information (Informationsnutzbarmachung, blaue Pfeile). Dadurch erschließt sich die Fachkraft Wissen, um einerseits entsprechend handlungsfähig zu sein und um andererseits mit diesem Wissen neue Wissensobjekte zu erzeugen bzw. fehlerhafte Wissensobjekte anzupassen (faktisches Handlungsfeld). Das bedeutet, dass die Kontextfaktoren in definierten Informationsmärkten zu finden sind und es die Informationsmärkte im Rahmen der Informationsgenerierung und die Kontextfaktoren im Rahmen der Informationsnutzbarmachung zu konkretisieren gilt.

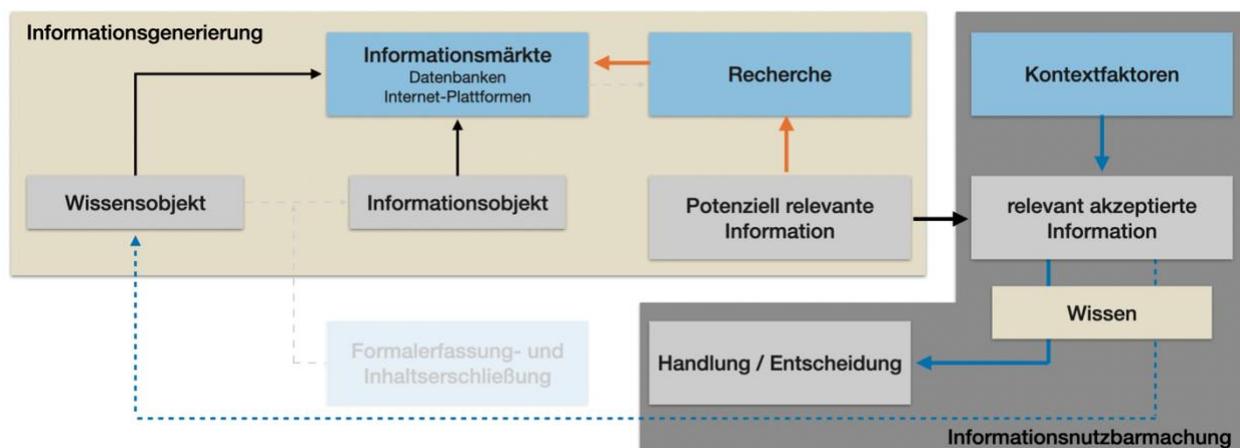


Abbildung 32: Adaptiertes Modell nach Kuhlen und Semar (2023) zur Informationsverarbeitung

Dies ist insofern schlüssig, da Hube bereits schreibt, dass das faktische Handlungsfeld Instrumente zur Handhabung der Komplexität des Arbeitsprozesses benötigt, welches einerseits eine Orientierung im Referenzhandlungsfeld gibt sowie andererseits das Referenzergebnis auf das Bezugsergebnis überträgt (Hube, 2005, S. 63). Durch die Umsetzung des erweiterten

Arbeitsmodells wird ausgehend von der dargestellten Betrachtung (vgl. Abbildung 31) ein Fehlerkatalog erstellt. Ausgangspunkt hierfür sind die möglichen Fehler der Prozessauswirkung aus der FMEA, mit denen die Fachkraft unmittelbar bei den Arbeiten im Prozess konfrontiert werden kann. Dieses vorliegende Bezugsproblem (Fehlfunktion der Prozessauswirkung) kann von den möglichen Fehlerarten hervorgerufen werden (Fehlfunktionen der verknüpften Arbeitssysteme) und stellt potenziell relevante Informationen im Referenzhandlungsfeld dar. Die Kontextfaktoren schließen dabei auf die Fehlerursache, welche im Abgleich bzw. durch gezielte Recherche in den Informationsmärkten zur relevant akzeptierten Information führen.

Für die Umsetzung des Arbeitsmodells gilt es daher, die Arbeitssysteme zu identifizieren, in denen die Fehler der Prozessauswirkung auftreten, sowie die Informationsmärkte zu dokumentieren, über denen die Kontextfaktoren erschlossen werden.

4 Forschungsansatz

Zum Forschungsansatz wird das Arbeitsmodell und dessen Erweiterung zunächst in ein methodisches Vorgehen (Abschnitt 4.1) überführt und entlang der Pilotierung (Abschnitt 4.2) erprobt, angepasst sowie auf die Einhaltung von Gütekriterien zur qualitativen Forschung geprüft. Der Forschungsansatz wird daraufhin im empirischen Feld (Abschnitt 4.3) anhand zweier exemplarischer AMC-Fertigungsverfahren umgesetzt und die erzielten Ergebnisse (Abschnitt 4.4) werden dargestellt.

4.1 Methodisches Vorgehen

Das methodische Vorgehen (Abbildung 33) zum Forschungsansatz lässt sich aus den Instrumentarien des theorie-integrativen Arbeitsmodells mit deren Umsetzungsreihenfolge ableiten und spiegelt sich in fünf konkreten Phasen wider. Mit der Umsetzung entsteht ein Erhebungs-Analyse-Auswertungs-Zyklus, der sukzessiv mit der Beantwortung der Fragestellungen verbunden ist. Die vorbereitende Phase 0 steht in direktem Bezug zur Analyse auf Ebene des AMC-Verfahrens und skizziert die rahmenden Bedingungen der folgenden Analysen. Daraufhin erfolgt in Phase I die Prozessstrukturierung über die DIN SPEC 17071 und den Arbeitsablaufplan sowie die Prozesssystematisierung über den Arbeitssystembaum. Mit dieser Strukturanalyse schließt das Vorgehen zur FMEA in Phase II an. Hierin werden die Zusammenhänge entlang der Fehler- und Risikoanalyse erschlossen. Im Rahmen von Phase III und ausgehend von der umgesetzten Datenbasis erfolgt die Kompetenzanalyse bzw. -generierung. Weiter wird in Phase IV die Fehleranalyse aus Phase II für das Thema Wissensarbeit und Informationsverarbeitung genutzt und darin das erweiterte Arbeitsmodell umgesetzt. Somit werden in Phase I und Phase II alle Handhabungen und Problemlösungen in der AMC-Umgebung zu Forschungsfrage 1 ermittelt, in Phase III die Kompetenzmatrizen zur Beantwortung der Forschungsfrage 2 erstellt sowie in Phase IV die Informationsgenerierung und -nutzbarmachung zur Sicherung der operativen Handlungsfähigkeit aus Forschungsfrage 3 erschlossen.

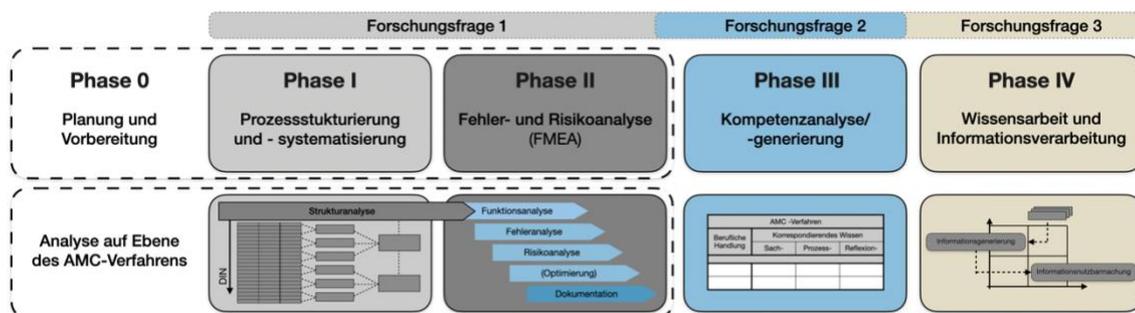


Abbildung 33: Fünf Phasen des methodischen Vorgehens mit Bezug zu den Forschungsfragen

Die Umsetzung des methodischen Vorgehens erfolgt entlang ausgewiesener Schritte, die entsprechend der verwendeten Instrumentarien in den spezifischen Phasen (Abschnitte 4.1.1 bis 4.1.4) mit adäquaten Erhebungsmethoden und datenspezifischen Analysen hinterlegt sind. Zusätzlich wurde ein eigenständiges Handbuch zum Forschungsansatz (siehe Anhang) mit

konkreten Ankerbeispielen, Formulierungssammlungen, Leitfragen zur Moderation etc. erstellt, welches bei der Durchführung des Ansatzes Anwendung findet. Aus Nachvollziehbarkeitsgründen zur Forschungsarbeit werden die Erhebungen sowie Rückbesprechungen audiovisuell aufgezeichnet.

4.1.1 Phase 0: Vorbereitung und Planung

Ziel von Phase 0 ist es, die AMC-Experten kennen zu lernen, einen ersten Überblick zum Verfahren zu erhalten, die Vorgehensweisen zu erfassen und die herstellbaren Produkte und Geometrien zu spezifizieren (*Schritt P0-1*). Dabei werden die relevanten Daten zu den Zielen und der Strategie des AMC-Verfahrens, der Organisation, den Bauteilen und Produktionsbedingungen, der Personalstruktur sowie dem Technikeinsatz entsprechend der ‚Analyse auf Ebene des AMC-Verfahrens‘ festgelegt und zusammen mit dem Projektplan zur FMEA dokumentiert (*Schritt P0-2*).

- *Schritt P0-1: Kontaktaufnahme und AMC-Überblick*

Über den ersten Schritt wird mit den Experten des zu untersuchenden AMC-Verfahrens Kontakt aufgenommen und ein (virtuelles) Auftaktmeeting organisiert. In diesem Meeting stellen sich die Experten selbst mit ihrer Rolle in der Entwicklung vor und präsentieren das AMC-Verfahren entlang einer strukturierten Guideline (Abbildung 34). Diese wird bei Kontaktaufnahme (per E-Mail) angehängt und beinhaltet die Kategorien: Rahmenbedingungen mit Bauteilgeometrie/CAD-Daten, Maschine, Materialien; Prozess mit Pre-, In- und Post-Prozess und Bauteileigenschaften. Eine daran anschließende offene Besprechung dient zur Vervollständigung der Daten (Tabelle 19) und bahnt die Übermittlung relevanter Dokumente an.



Abbildung 34: Struktur und Inhalte der Präsentation zum AMC-Verfahren entlang der Guideline

- *Schritt P0-2: Dokumentation der rahmenden Daten*

Mit dem zweiten Schritt zur Phase 0 werden die Daten des Meetings zusammen mit den angesprochenen, relevanten Dokumenten in Tabelle 19 eingetragen bzw. zusammengeführt. Dadurch entsteht ein erster Überblick zum AMC-Verfahren, zu den Zuständigkeiten der Experten, zum Vorgehen sowie zu den Rahmenbedingungen, welche über die darauffolgenden Phasen und Schritte vertieft werden.

Tabelle 19: Auswertungstabelle zur Phase 0

AMC-Verfahren	[...]
Organisation	[...]
Projekt-Zusammenfassung (Kurzbeschreibung)	[...]
Elemente der Konstruktion	[...]
Ziele und Meilenstein(e)	[...]

Meilenstein		Quartal				Beschreibung											
[Meilenstein-Nummer]		[mm/jj]				[...]											
Strategie																	
WP	Beschreibung	2020				2021				2022				202x			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
x.x	[Inhalt]																
Personalstruktur																	
Person						Zuständigkeit											
[Titel, Name, Vorname]						[...]											
Druckverfahren						[Schritte des Druckvorgangs]											
Technikeinsatz						[3D-Fertigungsmaschine]											
Materialeinsatz																	
Aggregate			Binder			Additive			Activator								
[...]			[...]			[...]			[...]								
FMEA – Projektplan																	
Z-Themenbereiche						Leitfragen											
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ziel und Zweck der FMEA ▪ Teamzusammensetzung mit Aufgabenzuweisung ▪ Werkzeuge ▪ Zeitplan 						<ul style="list-style-type: none"> ▪ Erfassung der Fehlerzusammenhänge mit Folge 1) Prozessauswirkung 2) Bauteileigenschaft; mit aktuellen Maßnahmen und deren Bewertung ▪ 1) [Expert:innen (Aufgaben)] 2) [Name bgeleitende/r Bauingenieur:in] Moderator:in, Schriftführer:in Tobias Ludwig (Moderator, Schriftführer) ▪ APIS, Maschinenbaum, Arbeitssystembaum Arbeitsablaufplan ▪ [Geplanter Analysezeitraum] 											

4.1.2 Phase I: Prozessstrukturierung und -systematisierung

Ziel der Phase I ist es, den AMC-Fertigungsprozess über die ablaufenden Tätigkeiten – vom CAD-Design bis zum finalen Produkt – im Arbeitsablaufplan zu explizieren, entlang der DIN SPEC 17071 zu strukturieren und über die Generierung von Arbeitssystemen über drei Ebenen zu systematisieren. Phase I gliedert sich in eine Prozessbeobachtung zur Erhebung prozessbezogener Daten (Schritt PI-1), eine Analyse und Auswertung zum Arbeitsablaufplan (Schritte PI-2 und PI-3) und die Generierung von Arbeitssystemen (Schritte PI-5 bis PI-8). Die Ergebnisse zum Arbeitsablaufplan und Arbeitssystembaum werden in den Schritten PI-4 und PI-9 gemeinsam mit den Experten rückbesprochen bzw. verifiziert.

▪ *Schritt PI-1: Prozessbeobachtung*

Mit dem ersten Schritt in Phase I wird eine ablauforientierte Prozessbeobachtung durchgeführt. Diese findet in den tatsächlichen AMC-Umgebungen statt und begleitet die Experten über den gesamten AMC-Fertigungsprozess – vom Design des Produktes bis zum fertigen Bauteil. Die Prozessbegleitung wird adäquat audiovisuell aufgezeichnet und die Tätigkeiten bestenfalls zeitgleich von den Experten kommentiert bzw. erläutert. Wichtig ist, dass der Prozess mit dessen Handhabungen, Parametern, den verwendeten Dokumenten etc. akribisch aufgezeichnet und verfolgt wird und dass bei zu schnellen Arbeitsschritten oder Unklarheiten nachgefragt wird, so dass mit dieser Beobachtung ein detaillierter, lückenloser Einblick in den gesamten AMC-Fertigungsprozess erschlossen wird. Diese Beobachtung vor Ort verifiziert dabei Teilinhalte der Präsentation aus Phase 0.

In den weiteren Schritten werden die Tätigkeiten, Arbeits-, Betriebs- und Hilfsmittel expliziert und zusammen mit den Anmerkungen der Arbeitsablaufplan (Tabelle 20) erstellt.

Tabelle 20: Aufbau des Arbeitsablaufplanes zur Auswertung der Phase I

Tätigkeit	Arbeits-/Betriebsmittel		Hilfsmittel	Anmerkungen
	Anlagenelement	Werkzeug		
[Relevanter Bereich der DIN SPEC 17071]				

▪ *Schritt PI-2: Analyse und Auswertung der Tätigkeiten*

Nachdem der Prozess als audio-visuelle Daten in Form von Video-Dateien vorliegt, erfolgt über Schritt PI-2 die Analyse der observierten Tätigkeiten mit deren Explikation im Arbeitsablaufplan (Tabelle 20 – Spalte 1). Alle beobachteten Tätigkeiten können bereits den ‚relevanten Bereichen‘ der DIN SPEC 17071 zugeordnet werden. Die Explikation der Tätigkeiten – wie in Abschnitt 3.2.1 unter Transformationsschritt 5 definiert – erfolgt über den kleinstmöglichen physischen Mehrwert im Prozess und wird über ein Substantiv in Verbindung mit einem Verb dokumentiert. Die Substantive beziehen sich zumeist auf Materialien (Sand, Zement etc.), Erzeugnisse (Parameter, Sketch, Dateien etc.), Gegenstände oder Arbeits-/Betriebs-/Hilfsmittel. Für die Findung geeigneter Verben sollte weitestgehend auf die Formulierungssammlung des Handbuches (siehe Anhang) zurückgegriffen werden. Für die Analyse und Auswertung gelten zudem folgende Grundsätze:

- Wiederholende Tätigkeitsabläufe werden nachvollziehbar vermerkt und die Videodateien gekennzeichnet.
- Audiell beschriebene und visuell zu sehende Arbeitsschritte sowie „warten“ werden sinngemäß als Tätigkeiten expliziert.

- Da es möglich ist, dass mehrere Personen zeitgleich arbeiten, kann es partiell notwendig sein, die Tätigkeiten von Mitarbeitenden im Hintergrund zu beobachten und schlüssig in den Arbeitsablaufplan zu integrieren.
- Der explizierte Prozess über die ablaufenden Tätigkeiten muss in dessen Logik nachvollziehbar sein.
- Sollten bei der Observation Fehler(-meldungen) aufgetreten sein, werden diese im Arbeitsablaufplan nur in den Anmerkungen dokumentiert und die Videodateien ebenfalls gekennzeichnet.

Das bedeutet, dass der Arbeitsablaufplan nach der Auswertung die reinen, fehlerfreien Tätigkeiten – vom Design bis zum fertigen Produkt – enthält.

▪ *Schritt PI-3: Analyse und Auswertung der Arbeits-/Betriebs-/Hilfsmittel und Anmerkungen*

Zu den Tätigkeiten werden die verwendeten Arbeits-/Betriebsmittel (Spalte 2 und 3) und Hilfsmittel (Spalte 4) dokumentiert und zusätzliche Erklärungen über die Anmerkungen in Spalte 5 ergänzt. Bezüglich der Dokumentation der Anlagenteile wird ein Maschinenbaum⁷ herangezogen. Die Werkzeuge und Hilfsmittel entsprechen wiederum den Definitionen zu den Arbeitssystemkomponenten (vgl. Tabelle 17 sowie Abschnitt 3.2.1). Die Anmerkungen beschreiben Zusammenhänge, vertiefende Verständnisse zum Arbeitsschritt oder die aufgetretenen Fehlerbilder der observierten Tätigkeiten.

▪ *Schritt PI-4: Besprechung zum Arbeitsablaufplan*

Den Arbeitsablaufplan gilt es anschließend mit den Experten zu besprechen und hinsichtlich fehlender Tätigkeiten zu ergänzen sowie gegebenenfalls mit Fachbegriffen anzupassen.

Nach der Strukturierung des AMC-Fertigungsprozesses entlang des Arbeitsablaufplans erfolgt die Systematisierung über den Arbeitssystembaum. Hierzu wird die Logik zum Arbeitsablauf in Arbeitssystemen aus Abbildung 30 (Abschnitt 3.2.1) aufgegriffen und in konkrete Schritte zur Generierung überführt:

▪ *Schritt PI-5: Unterscheidung in Haupt- bzw. vor- und nachbereitende Tätigkeiten*

Mit dem Schritt PI-5 werden die Haupt- bzw. vor- und nachbereitenden Tätigkeiten im Arbeitsablaufplan kenntlich gemacht. Die Haupttätigkeiten sind dabei aktiv auf die Erzeugung eines Outputs ausgerichtet, die vor- und nachbereitenden Tätigkeiten richten den Arbeitsplatz ein, stellen den Input bereit, räumen den Arbeitsplatz auf bzw. bereiten den Input entsprechend nach.

▪ *Schritt PI-6: Generierung der Sub-Arbeitssystemebene*

Über Schritt PI-6 werden die Outputs der Sub-Arbeitssysteme identifiziert, dadurch die Sub-Arbeitssysteme generiert und hierzu die vor- bzw. nachbereitenden Tätigkeiten schlüssig zugeordnet. Die Sub-Arbeitssysteme werden konkret über mehrere zielgerichtete

⁷ Sollte kein Maschinenbaum vorliegen, wird dieser von den Experten und dem prozessbegleitenden Bauingenieur erstellt. Sofern ein Maschinenbaum vorhanden ist, wird dieser gemeinsam reflektiert.

Haupttätigkeiten und die dadurch entstehenden Teilergebnisse erschlossen. Wichtig an dieser Stelle ist, dass eine Haupttätigkeit allein kein Sub-Arbeitssystem darstellt und eine mögliche Neuordnung bzw. Sortierung von Tätigkeiten nicht deren definierte Reihenfolge eliminieren. Für die Benennung des Sub-Arbeitssystems wird (wenn möglich) das Teilerzeugnis als Substantiv und bei den tätigkeitsbeschreibenden Verben wiederum die Formulierungssammlung (siehe Handbuch – Anhang) verwendet. Die Teil-Outputs werden als Notiz vermerkt bzw. dokumentiert.

- *Schritt PI-7: Generierung der Arbeitssystemebene*

Zu Schritt PI-7 gilt es, die Arbeitssysteme aus den Abläufen der Sub-Arbeitssysteme zu identifizieren und zu generieren. Da entlang der Sub-Arbeitssysteme lediglich Teilergebnisse erstellt werden, können diese in Summe und in ihrem Ablauf zu vollständigen Ergebnissen bzw. Outputs zusammengeführt werden. Diese Outputs werden ebenfalls als Notiz vermerkt bzw. dokumentiert und können zudem über Adjektive spezifiziert werden. Hinzu kommt, dass baujob-spezifische Arbeitssysteme von baujobunabhängigen Arbeitssystemen unterschieden werden können. Letztere werden dabei zu jedem AM-Fertigungsprozess gleich ausgeführt und enthalten keine baujobspezifischen Daten oder Gegebenheiten.

- *Schritt PI-8: Revision*

Mit dem Schritt PI-8 erfolgt eine Revision des gesamten Arbeitssystembaums. Hierbei wird insbesondere die Logik gemäß Abbildung 30 in Abschnitt 3.2.1 mit 1) der Bündelung von Tätigkeiten in Sub-Arbeitssysteme und deren Teil-Outputs; 2) der Zusammenfassung von Sub-Arbeitssystemen zu den Arbeitssystemen und deren Outputs sowie 3) der Zuordnung der Arbeitssysteme zu den übergeordneten Arbeitssystemen reflektiert. Die Summe der Arbeitssystem-Outputs schließt dabei die Organisationseinheit ab.

- *Schritt PI-9: Besprechung zum Arbeitssystembaum*

Abschließend zur Phase I werden der Arbeitssystembaum mit den Arbeitssystemelementen und deren Outputs intensiv mit den Experten (virtuell) rückbesprochen, ergänzt oder gegebenenfalls angepasst und dadurch verifiziert. Dieser Schritt und auch die konkrete, nachvollziehbare Benennung des Outputs sind wichtig, da die Arbeitssysteme und deren Ergebnisse in die FMEA münden und dadurch die Grundlage der weiteren Erhebung sind.

4.1.3 Phase II: Fehler- und Risikoanalyse

Ziel der Phase II ist es, die Einflussfaktoren und deren Zusammenhänge in ihrer Komplexität entlang der Fehler- und Risikoanalyse zu erschließen und zusammen mit den aktuellen Vermeidungs- und Entdeckungsmaßnahmen inklusive Bewertung im Formblatt zur FMEA zu dokumentieren. Hierfür wird das FMEA-typische Format von Workshops genutzt, da nur so gemeinsam mit den Experten die Schritte zur FMEA erarbeitet werden können. Die Dokumentation der Ergebnisse erfolgt in der FMEA-Software APIS. Bevor die regulären Schritte zur FMEA nach AIAG & VDA 2019 umgesetzt werden, gilt es, die Systemstruktur in der FMEA-Software APIS zu erstellen (Schritt PII-1) sowie die bereits erhobenen, relevanten Daten zu

überführen (Schritt PII-2). Für die Vorbereitung der Systemstruktur und die Überführung der Daten (Abbildung 35) werden primär der Maschinenbaum, der Arbeitsablaufplan sowie der Arbeitssystembaum verwendet. Die Systemstruktur der FMEA folgt dabei dem Fehlerkettenmodell (vgl. Abbildung 23, Kapitel 2.3.1.1).

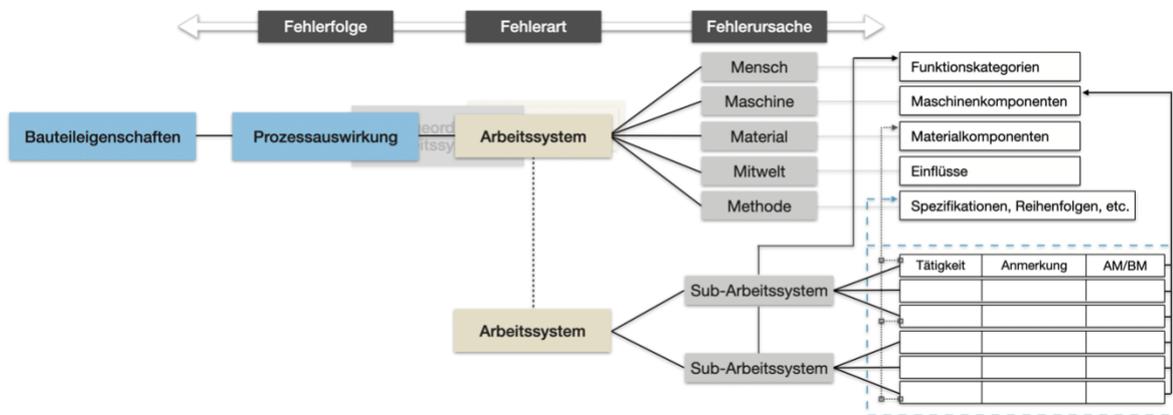


Abbildung 35: Systematische Vorbereitung und Überführung der Daten in die FMEA-Software

▪ *Schritt PII-1: Vorbereitung der Systemelemente in APIS*

Die FMEA hat das Systemelemente „Bauteileigenschaften“ sowie „Prozessauswirkungen“ zur Fehlerfolge (vgl. Tabelle 18, Kapitel 3.2.1) und werden in entsprechender Reihenfolge als Systemelemente erstellt. Daran werden die Systemelemente der ‚Übergeordneten Arbeitssysteme‘ als Zwischenebene – mit einer rein strukturierenden Funktion – angehängt. Zur Fehlerart werden die Arbeitssysteme aus dem Arbeitssystembaum als Systemelemente übernommen. Daran schließen jeweils die Systemelemente Mensch, Maschine, Material, Mitwelt und Methode aus den 5M's zur Prozess-FMEA an.

▪ *Schritt PII-2: Vorstrukturierung in den Systemelementen*

Die Bauteileigenschaften können bereits im Vorfeld mit Funktionen zur ‚Bauteilgeometrie‘ und ‚Materialeigenschaften‘ sowie die Prozessauswirkung mit Funktionen zum ‚Prozessdurchlauf‘, ‚Prozesspause‘, ‚Prozessabbruch‘ und ‚Auswirkung auf Folgeprozesse‘ vorstrukturiert werden. Zudem können die erhobenen Daten zur Strukturierung der Ursachenelemente über sogenannte ‚Funktionskategorien‘ verwendet werden (vgl. Handbuch – Anhang). Dies betrifft die Sub-Arbeitssysteme für den Menschen⁸, die Anlagenkomponenten bzw. Gruppierungen zur Maschine, die verwendeten Einzelbestandteile sowie Mischungen innerhalb der Materialien sowie die Methode – sofern bekannt – als Ableitung bestimmter Reihenfolgen oder

⁸ Durch die Übernahme der Sub-Arbeitssysteme als Funktionskategorien des Menschen entsteht eine gezielte Abstrahierung von den spezifischen Tätigkeiten, da trotz Verifizierung durch die Experten die Möglichkeit bestehen könnte, nicht alle Tätigkeiten observiert bzw. expliziert zu haben. Das bedeutet, dass bei der Durchführung der Funktionsanalyse des Menschen (im Rahmen von Schritt 3 zur FMEA im Workshop) die erforderlichen, notwendigen Tätigkeiten (Schlüsseltätigkeiten) zum Arbeitssystem nochmals kognitiv durchdacht werden. Somit wird einerseits die Vollständigkeit sichergestellt und andererseits die Moderation entlang der Funktionskategorien erleichtert. Zudem kann der Moderator die spezifischen Tätigkeiten aus dem Arbeitsablaufplan als Abgleich oder Hilfestellung verwenden.

Spezifikationen aus dem Arbeitsablaufplan. Lediglich zur Mitwelt können keine Anhaltspunkte überführt werden.

Nach diesen beiden Vorbereitungsschritten folgt die konkrete Durchführung der Workshops entlang der Schritte PII-3 bis PII-6. Die Schritte PII-3 und PII-4 können je nach präferierter Handhabung linear je Arbeitssystem oder iterativ je Systemelement erfolgen.

- *Schritt PII-3: Funktionen*

Schritt PII-3 hat zum Ziel, die Funktionen in den Systemelementen zu erschließen. Dies betrifft die Anforderungen an die Arbeitssystem-Outputs, die Tätigkeitsfunktionen zum Menschen, die Maschinenkomponenten, die Eigenschaften der Materialien, die Versorgungs- und Umgebungseinflüsse der Mitwelt und die umgesetzten Methoden.

- *Schritt PII-4: Fehlfunktionen und Fehlernetz*

Mit dem Schritt PII-4 werden alle möglichen Fehler in Form von Fehlfunktionen auf den Untersuchungsgebieten der 5M-Ursachen, den Arbeitssystemen und der Prozessauswirkung abgeleitet. Zudem werden deren Einflüsse und Zusammenhänge zu einem Fehlernetz verknüpft.

- *Schritt PII-5: Vermeidungs- und Entdeckungsmaßnahmen mit Risikobewertung*

Die Fehlfunktionsnetze werden von der FMEA-Software in entsprechende FMEA-Formblätter (Tabelle 21) der jeweiligen Arbeitssysteme überführt. Die Fehlerfolgen aus Prozessauswirkung und Bauteileigenschaften mit deren Bedeutung befinden sich in den Spalten 1 und 2, die Fehlerart in Spalte 3 sowie die Fehlerursache in Spalte 4. Im Rahmen des Schrittes PII-5 werden deren Vermeidungsmaßnahme mit Auftretenswahrscheinlichkeit in den Spalten 5 und 6 und Entdeckungsmaßnahmen mit Entdeckungswahrscheinlichkeit in den Spalten 7 und 8 eingetragen. Die Risikoprioritätszahl (PRZ) und die Aufgabenpriorität (AP) in den Spalten 9 und 10 werden von der FMEA-Software automatisch errechnet.

Tabelle 21: Exemplarische Darstellung des Aufbaus zur tabellarischen Dokumentation der Daten entlang des FMEA-Formblattes

Fehlerfolge	B	Fehlerart	Fehlerursache	Vermeidungsmaßnahme	A	Entdeckungsmaßnahme	E	RPZ	AP	V/T	
Systemelement: <input type="checkbox"/> Arbeitssystem											
Funktion: Funktion Arbeitssystem											
[Prozessauswirkung] Fehlfunktion Prozessauswirkung		Fehlfunktion Arbeitssystem	[Mensch] Fehlfunktion Mensch	Maßnahmenstand - Anfang: 15.12.2023		[Entdeckungsmaßnahme]					
			[Vermeidungsmaßnahme]	[Entdeckungsmaßnahme]							
			[Vermeidungsmaßnahme Optimierung]	[Entdeckungsmaßnahme Optimierung]							
[Bauteileigenschaften] Fehlfunktion Bauteilanforderung			[Maschine] Fehlfunktion Maschine	Maßnahmenstand - Anfang: 15.12.2023		[Entdeckungsmaßnahme]					
			[Vermeidungsmaßnahme]	[Entdeckungsmaßnahme]							
			[Vermeidungsmaßnahme Optimierung]	[Entdeckungsmaßnahme Optimierung]							
			[Material] Fehlfunktion Material	Maßnahmenstand - Anfang: 15.12.2023		[Entdeckungsmaßnahme]					
			[Vermeidungsmaßnahme]	[Entdeckungsmaßnahme]							
			[Vermeidungsmaßnahme Optimierung]	[Entdeckungsmaßnahme Optimierung]							
			[Mitwelt] Fehlfunktion Mitwelt	Maßnahmenstand - Anfang: 15.12.2023		[Entdeckungsmaßnahme]					
			[Vermeidungsmaßnahme]	[Entdeckungsmaßnahme]							
			[Vermeidungsmaßnahme Optimierung]	[Entdeckungsmaßnahme Optimierung]							
			[Methode] Fehlfunktion Methode	Maßnahmenstand - Anfang: 15.12.2023		[Entdeckungsmaßnahme]					
			[Vermeidungsmaßnahme]	[Entdeckungsmaßnahme]							
			[Vermeidungsmaßnahme Optimierung]	[Entdeckungsmaßnahme Optimierung]							

- *Schritt PII-6: Optimierung (optional)*

Zu Schritt PII-6 können bereits Optimierungen aufgenommen und dokumentiert werden. Diese werden entsprechend in den Zeilen darunter notiert und in Spalte 11 (Tabelle 21) jeweils mit einer Verantwortlichkeit (V) und einer Fälligkeit (T) versehen. Dieser Schritt ist Teil der Weiterführung

zur FMEA – daher optional – und kein Bestandteil der folgenden Kompetenzanalyse/-generierung.

4.1.4 Phase III: Kompetenzanalyse/-generierung

Ziel der Phase III ist die Analyse und Generierung AMC-relevanter Kompetenzen aus der empirischen Datenbasis der Phasen I und II. Hierzu folgt eine strukturierte Überführung (Abbildung 36) der erhobenen Daten aus dem Arbeitssystembaum, dem Arbeitsablaufplan und der FMEA sowie damit verbunden die Diagnostik der handlungsdeterminierenden Dispositionen. Das Analyseraster AMC-relevanter Kompetenzen greift hierbei die fundierte fachlich-methodische Kompetenzmatrix (vgl. Tabelle 1, Kapitel 2.1.1.4) auf und wird jeweils zu einem Fertigungsverfahren erstellt. Die Matrix wird über die übergeordneten Arbeitssysteme, also entlang der DIN SPEC 17071, vorstrukturiert und die Arbeitssysteme werden in berufliche Handlungen überführt. Das Sachwissen, also das Wissen über Gegenstände, Werkzeuge etc., entstammt primär dem Arbeitsablaufplan und wird mit den Daten der FMEA abgeglichen bzw. angereichert. Das Prozesswissen, also das Wissen über berufliche Handlungssequenzen, wird insbesondere aus den Sub-Arbeitssystemen überführt und mit den FMEA-Funktionen des Menschen ergänzt. Die Verständniszusammenhänge des Reflexionswissens werden aus dem Fehlernetz mit dessen Ursachen und Folgen hergeleitet und stammen daher nur aus der FMEA.

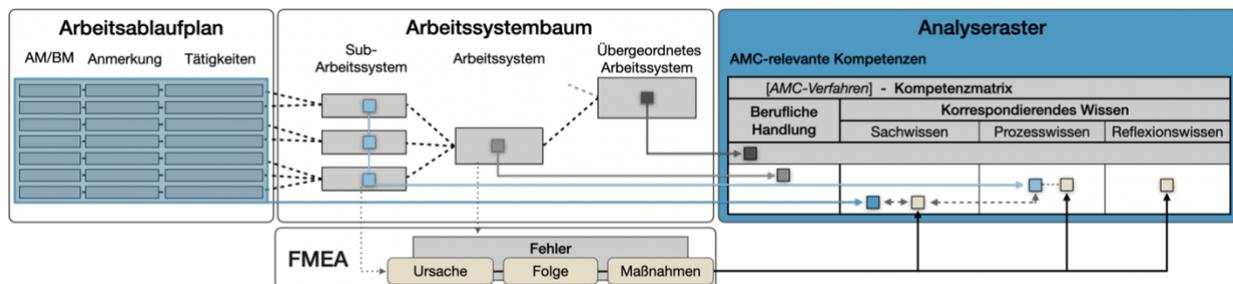


Abbildung 36: Analyse AMC-relevanter Kompetenzen

Ausgehend von den eben dargestellten, rahmenden Bezügen erfolgt die konkrete Analyse und Generierung der Teilkompetenzen in die AMC-Kompetenzmatrix (Tabelle 22) über insgesamt zehn Schritte:

- *Schritt PIII-1: Benennung der Kompetenzmatrix*

Da die Kompetenzmatrix für ein Fertigungsverfahren erstellt wird, wird die Bezeichnung des Fertigungsverfahrens in die erste Zeile eingetragen.

- *Schritt PIII-2: Vorstrukturierung entlang der DIN SPEC 17071:2019*

Als Nächstes werden die übergeordneten Arbeitssysteme, also die ‚relevanten Bereiche‘ der DIN SPEC 17071:2019, in deren Abfolge in die dafür vorgesehenen Zeilen eingetragen und die Kompetenzmatrix dadurch vorstrukturiert.

▪ *Schritt PIII-3: Überführung der Arbeitssysteme in berufliche Handlungen*

Über Schritt PIII-3 werden die Arbeitssysteme in deren Abfolge und Zuordnungen zur DIN in berufliche Handlungen überführt sowie sprachlich umformuliert. Als Beispiel: Das Arbeitssystem ‚Baujob vorbereiten‘ wird als ‚Die Fachkraft [...] bereitet den Baujob vor.‘ in die Matrix eingetragen. Diese Überführung und Umformulierung erfolgt mit jedem Arbeitssystem des Arbeitssystembaums.

Tabelle 22: Kompetenzmatrix AMC-relevanter Kompetenzen

Fertigungsverfahren	Korrespondierendes Wissen		
Berufliche Handlung <i>Die Fachkraft...</i>	Sachwissen	Prozesswissen	Reflexionswissen
<i>[Relevanter Bereich aus DIN SPEC 17071:2019]</i>			
... <i>[Arbeitssystem]</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Anlagenelemente: <ul style="list-style-type: none"> • ... ▪ Werkzeuge: <ul style="list-style-type: none"> • ... ▪ Hilfsmittel: <ul style="list-style-type: none"> • ... ▪ Materialarten/-eigenschaften: <ul style="list-style-type: none"> • ... ▪ Umgebungsanforderungen: <ul style="list-style-type: none"> • ... ▪ Externe Anschlüsse/Versorgung: <ul style="list-style-type: none"> • ... ▪ ... <i>[FMEA-Methode]</i> <ul style="list-style-type: none"> • ... 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>[Sub-Arbeitssystem]</i> <ul style="list-style-type: none"> • <i>[Funktion]</i> • <i>[Funktion]</i> • ... ▪ ... <ul style="list-style-type: none"> • ... 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>[Fehlernetz zur Fehlerart im Arbeitssystem]</i> ▪ ...

Mit den iterativen Schritten PIII-4 bis PIII-10 gilt es, das korrespondierende, kompetenzrelevante Wissen zu den jeweiligen beruflichen Handlungen zu analysieren. Die folgenden Schritte beziehen sich daher unmittelbar auf ein Arbeitssystem. „Bisherige Erfahrungen haben gezeigt, dass sich der Beginn mit dem Prozesswissen leichter darstellt, da dieses in unmittelbarem Bezug zur beruflichen Handlung steht und sich aus diesem ableiten lässt. Das Prozesswissen ist dabei ein anwendungs- und umsetzungsabhängiges Wissen über berufliche Handlungssequenzen, konkrete berufliche Prozesse sowie Abläufe“ (Pittich, 2023, S. 18). Gleiches gilt für das Prozesswissen der vorliegenden Analyse.

▪ *Schritt PIII-4: Explikation des Prozesswissens – Arbeitssystembaum*

Die Sub-Arbeitssysteme eines Arbeitssystems stellen eine erste Gliederung der beruflichen Handlungssequenzen dar und werden über Schritt PIII-4 in das Prozesswissen überführt. Hierbei ist wichtig, dass die ‚Teilhandlungen‘ in entsprechende Kognitionen expliziert werden. Dies bedeutet exemplarisch, dass das Sub-Arbeitssystem ‚Baujobbezogene Daten einstellen‘ in die Kognition ‚Einstellung baujobbezogener Daten‘ überführt und in die Spalte zum Prozesswissen eingetragen wird. Mit dieser Logik wird daher nicht mehr das ‚Einstellen‘ als ‚Tun‘ fokussiert, sondern die ‚Einstellung‘ als ‚Wissensaspekt‘. Für diese Überführung in Kognitionen ist die Verwendung der Formulierungssammlung (siehe Handbuch – Anhang) hilfreich. Gleiches wird für die weiteren Sub-Arbeitssysteme des Arbeitssystems vorgenommen.

▪ *Schritt PIII-5: Ergänzungen zum Prozesswissen – FMEA*

Im nächsten Schritt PIII-5 wird die FMEA zur Ergänzung des Prozesswissens herangezogen. Hierzu werden die Funktionen des Menschen zum jeweiligen Arbeitssystem betrachtet. Da die Sub-Arbeitssysteme die Funktionskategorien darstellen und diese bereits aus dem Arbeitssystembaum in die Kompetenzmatrix übernommen wurden, werden die spezifischen Funktionen des Menschen innerhalb dieser Funktionskategorien als Unterpunkte – zweite Ebene – des jeweiligen Prozesswissens überführt (Tabelle 22). Zudem gelten folgende, erweiterte Grundsätze:

- Anforderungs-, druck- oder bedarfsspezifische Spezifikationen sowie Vorgaben werden nicht übernommen.
- Funktionen, die in der FMEA mehrmals auftauchen oder als Verweise zu anderen Arbeitssystemen dokumentiert worden sind, werden in allen Fällen ebenfalls als Prozesswissen zur beruflichen Handlung übernommen bzw. aus dem entsprechenden Prozesswissen kopiert und an vorgesehener Stelle eingefügt. Zweiteres erfordert jedoch eine logische Übernahme bzw. kann mit Korrekturanpassungen verbunden sein, da beispielsweise die ‚Beschriftung von Einzelmaterialien und Materialmischungen‘ sowohl im Ausgangsmaterialmanagement erfolgt als auch bei der ‚Abfüllung der Materialmischung‘. Hier muss logischerweise der Teil ‚Einzelmaterialien und‘ rausgenommen werden.
- Sollte eine der Funktionen der FMEA gleich zur Funktionskategorie sein und dadurch gleich der Formulierung zum Aufzählungspunkt des Prozesswissens sein, wird für diesen Aufzählungspunkt der ersten Ebene eine andere, übergreifende Begrifflichkeit aus der Formulierungssammlung gewählt.

▪ *Schritt PIII-6: Explikation der Sachwissensaspekte – Arbeitsablaufplan*

In Schritt PIII-6 wird das Sachwissen, also das anwendungs- und umsetzungsunabhängige Wissen über Gegenstände, Werkzeuge etc. aus dem Arbeitsablaufplan, in die Kompetenzmatrix überführt. Hierzu werden alle Arbeits-/Betriebs- und Hilfsmittel zum jeweiligen Arbeitssystem übertragen und den entsprechenden Gruppierungen erster Ebene – ‚Anlagenelemente‘, ‚Werkzeuge‘ und ‚Hilfsmittel‘ (siehe Tabelle 22) – zugeordnet. Auf zweiter Ebene erfolgt die

Auflistung der jeweiligen Elemente aus dem Arbeitsablaufplan. Die Gruppierungen können bei Bedarf noch spezifiziert werden (z. B. Misch- und Wiegehilfsmittel).

▪ *Schritt PIII-7: Ergänzung der Sachwissensaspekte – FMEA*

Mit Schritt PIII-7 wird das Sachwissen zur beruflichen Handlung aus den jeweiligen Arbeitssystemdaten der FMEA in folgender Reihenfolge angereichert:

- Maschine: Zunächst werden die eben dokumentierten Anlagenelemente, Werkzeuge und Hilfsmittel mit den in der FMEA dokumentierten Funktionen abgeglichen und mit den fehlenden Elementen angereichert. Hierbei werden die Informationen aus den (Fehl-)Funktionen im Nominalstil ergänzt.
- Methode: Da die FMEA so strukturiert ist, dass der Mensch in den meisten Fällen ‚nach Vorgabe‘ arbeitet, werden im nächsten Schritt die Vorgaben, die im Rahmen der Methode spezifiziert wurden, als Aufzählungen erster Ebene dokumentiert (siehe Tabelle 22). Sollten die Methoden bereits in einer Unterebene aufgelistet sein, werden diese in die erste Ebene überführt.
- Material: Weiter werden die Materialien zum Sachwissen ergänzt. Hierfür wird auf erster Ebene die Gruppierung ‚Materialarten/-eigenschaften‘ ergänzt (siehe Tabelle 22) und auf zweiter Ebene werden die Materialien aufgelistet. Sollten keine Materialien vorhanden sein, wird die Gruppierungsvorlage gelöscht.
- Mitwelt: Zu den Umgebungs- und Versorgungseinflüssen wird auf erster Ebene zum Sachwissen die Gruppierung ‚Umgebungsanforderungen‘ für die Umgebungseinflüsse und ‚Externe Anschlüsse/Versorgung‘ für die Versorgungseinflüsse erstellt (siehe Tabelle 22) sowie die enthaltenen Elemente auf zweiter Ebene übertragen. Sollten keine Elemente zur Mitwelt vorhanden sein, wird die Gruppierungsvorlage gelöscht.
- Mensch: Weiter erfolgt die Ergänzung der Informationen aus den Funktionen und Fehlfunktionen des Ursachenelements ‚Mensch‘. Dies betrifft insbesondere eine Konkretisierung der bereits festgehaltenen Methoden-Spezifikationen (erste Ebene). Die enthaltenen, relevanten Daten werden hierzu auf zweiter und/oder dritter Ebene – je nach logischer Bündelung bzw. Zusammenfassung – ergänzt.
- Arbeitssystem: Zudem wird das Sachwissen mit relevanten Informationen bzw. Anforderungen aus den (Fehl-)Funktionen des Arbeitssystems selbst angereichert. Hierzu sollte die Erstellung einer ersten Ebene nicht mehr notwendig sein – vielmehr sind hier die bereits dokumentierten Ebenen abzugleichen und gegebenenfalls zu ergänzen.

▪ *Schritt PIII-8: Ergänzung der Sachwissensaspekte – Arbeitsablaufplan*

Abschließend zum Sachwissen werden über Schritt PIII-8 letzte Ergänzungen aus den Haupttätigkeiten des Arbeitsablaufplans vorgenommen. Hierin können noch zusätzliche Daten, wie beispielsweise Parameter, aufgelistet sein, die in den entsprechenden Gruppierungen hinzugefügt werden.

▪ **Schritt PIII-9: Explikation der Reflexionswissensaspekte – Fehlernetz**

Schließlich gilt es, über Schritt PIII-9 das Reflexionswissen zu explizieren. Hierfür wird das Fehlernetz der FMEA (Abbildung 37) bezüglich der Fehlerarten, Prozess- und Bauteilauswirkungen sowie der Ursachen untersucht. Fokuselement des Fehlfunktionsnetzes sind die Arbeitssystem-Fehlfunktionen. Die Verständniszusammenhänge des Reflexionswissens ergeben sich dabei über ableitbare Zusammenhänge und werden einerseits zu deren Ursachen und andererseits zu deren Prozessauswirkungen analysiert. Unterstützend bei der Ableitung kann ebenfalls auf eine Formulierungssammlung (siehe Handbuch – Anhang) zurückgegriffen werden.

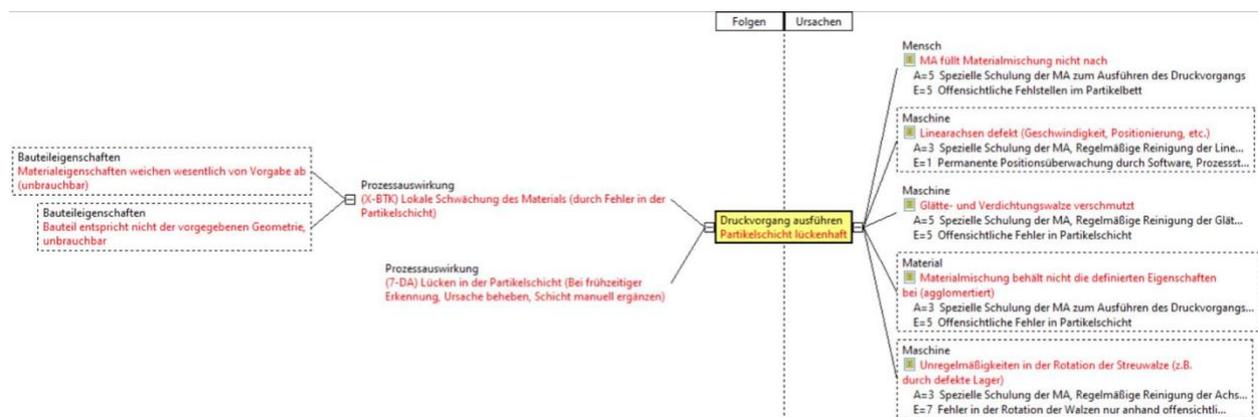


Abbildung 37: Exemplarisches Fehlernetz mit Fokuselement auf der Arbeitssystem-Fehlfunktion

▪ **Schritt PIII-10: Revision**

Abschließend wird mit Schritt PIII-10 eine Revision der Teilkompetenz in der Matrix durchgeführt. Hierbei wird insbesondere überprüft, ob zum Prozesswissen das relevante Sachwissen und umgekehrt vorhanden ist bzw. sich diese konsequent aufeinander beziehen. Das Reflexionswissen sollte hierbei die Zusammenhänge und vertiefenden Verständnisse zur beruflichen Handlung aufzeigen. Bei Schwachstellen müssen die fehlerhaften Schritte erneut ausgeführt werden.

4.1.5 Phase IV: Wissensarbeit und Informationsverarbeitung

Ziel der Phase IV ist es, den Grad an potenziell enthaltener Wissensarbeit in den Arbeitssystemen sowie die Informationsmärkte der Informationsgenerierung und Kontextfaktoren der Informationsnutzbarmachung zur Sicherung der operativen Handlungsfähigkeit zu erschließen und damit das erweiterte Arbeitsmodell umzusetzen. Hierzu erfolgt nach der Vorbereitung von Vorlagen (Schritt PIV-1) die Erhebung mit den beteiligten Experten. Diese gliedert sich in die Bestimmung des Grades an Wissensarbeit (Schritt PIV-2), die Dokumentationen zu den Fehlfunktionen der Prozessauswirkungen und des auftretenden Arbeitssystems (Schritt PIV-3) und in die Dokumentationen der Informationsmärkte zu den Fehlfunktionen im Ursachegebiet (Schritt PIV-4). Abschließend werden die Daten im Fehlerkatalog zusammengeführt (Schritt PIV-5).

- *Schritt PIV-1: Vorbereitung der Vierfeldertafel zur Wissensarbeit*

Mit dem ersten Schritt zur Phase IV wird für die Bestimmung des Grades an potenziell enthaltener Wissensarbeit eine Präsentationsfolie (Abbildung 38) mit der Vierfeldertafel, den nummerierten Arbeitssystembezeichnungen und einer entsprechenden Anzahl an Kreuzen vorbereitet.

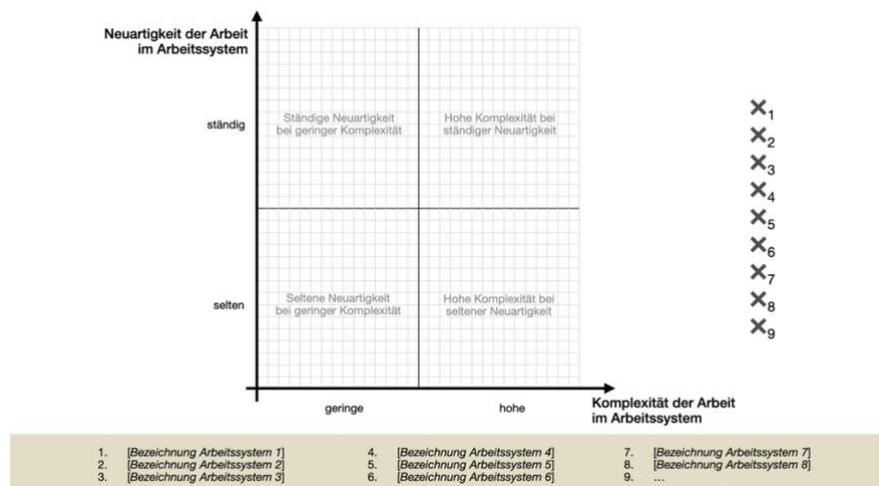


Abbildung 38: Schematische Darstellung der vorbereiteten Präsentationsfolie zur Erschließung des Grades der enthaltenen Wissensarbeit im Soll- und Fehlzustand eines Arbeitssystems

- *Schritt PIV-2: Einschätzung zur Wissensarbeit in Arbeitssystemen*

Mit Schritt PIV-2 werden daraufhin in einem (virtuellen) Meeting gemeinsam mit dem Experten dessen Einschätzungen zur Neuartigkeit und Komplexität der Arbeit in den jeweiligen Arbeitssystemen dokumentiert. Hierzu werden die Kreuze entlang von Leitfragen (siehe Handbuch – Anhang) auf den entsprechenden Achsen platziert. Bei Unsicherheit des Experten wird die Moderation weitergeführt und nochmals die thematischen Bezüge zur Neuartigkeit und Komplexität erklärt, ohne dabei eine Wertung bzw. einen Meinungseinfluss hervorzurufen. Bei weiterer Unsicherheit wird der komplexeste bzw. neuartigste Fall festgehalten. Zusätzlich werden der höchste akademische und/oder berufliche Abschluss sowie die Berufserfahrung des Experten notiert.

- *Schritt PIV-3: Auftreten der Fehlfunktionen der Prozessauswirkung*

In dem (virtuellen) Meeting können zudem die Fehlfunktionen der Prozessauswirkungen hinsichtlich deren auftretenden Arbeitssysteme identifiziert werden. Das bedeutet, dass dem Experten die erarbeitete FMEA gezeigt wird und hierbei gemeinsam jede Fehlfunktion der Prozessauswirkung mit dem Arbeitssystem vermerkt wird, in dem der Mitarbeitende den Fehler bemerkt bzw. damit konfrontiert wird. Die Moderation der Erhebung wird dabei ebenfalls entlang von Leitfragen (siehe Handbuch – Anhang) umgesetzt.

- *Schritt PIV-4: Erschließung der Informationsmärkte*

Mit anschließendem Schritt PIV-4 gilt es, die Informationsmärkte zu den Fehlfunktionen der Ursachen zu dokumentieren. Hierzu werden zusammen mit den Experten die jeweilige Fehlfunktion der 5M-Ursachenelemente in der FMEA fokussiert und die möglichen Informationsmärkte notiert. Die genannten Informationsmärkte werden in der Software APIS über die ‚Bemerkungen‘ zu den jeweiligen Fehlfunktionen festgehalten. Die Moderation folgt hierbei ebenfalls entsprechenden Leitfragen (siehe Handbuch – Anhang).

- *Schritt PIV-6: Erstellung des Fehlerkatalogs*

Die Daten der FMEA werden mit Schritt PIV-6 materialanalytisch zu einem Fehlerkatalog zusammengetragen. Der Fehlerkatalog ist eine tabellarische Auflistung (Tabelle 23) der Fehlerketten ausgehend von den Fehlfunktionen der Prozessauswirkung (Bezugsproblem – Spalte 1). Für die Nachvollziehbarkeit, woher dieser Fehler kommt (potenziell relevante Informationen), wird das Arbeitssystem mit dessen Fehlfunktion (Fehlerart – Spalte 2 und 3) übertragen. Zudem werden die spezifischen Informationsmärkte, in denen recherchiert werden kann aus den Bemerkungen übertragen (Spalte 4). Im Rahmen der Informationsnutzbarmachung werden die Fehlfunktionen der entsprechenden Ursachen als Kontextfaktoren (Spalte 8) notiert. Weiterführende Informationen liefern hierzu die Ursachenelemente (Mensch, Maschine, Material, Mitwelt, Methode – Spalte 5) sowie die Auftretens- (A – Spalte 6) und Entdeckungswahrscheinlichkeiten (E – Spalte 7).

Tabelle 23: Fehlerkatalog zu den Fehlfunktionen der Prozessauswirkung mit Informationsmärkten und Kontextfaktoren

Bezugsproblem	Informationsgenerierung			Informationsnutzbarmachung			
	potenziell relevante Informationen			relevant akzeptierte Informationen			
Fehlfunktion Prozessauswirkung	Arbeitssystem	Fehlfunktion	Informations- märkte	Ursache	A	E	Kontextfaktoren

4.2 Pilotierung des Forschungsansatzes

Das methodische Vorgehen zum Forschungsansatz ist in dessen Entwicklung einer Pilotierung am SCA-Fertigungsverfahren unterzogen worden, um mit den dadurch gewonnenen Erkenntnissen vor der Umsetzung im empirischen Feld Verbesserungen (Abschnitt 4.2.1) vernehmen zu können. Die Pilotierung lieferte dabei erste Ergebnisse (Abschnitt 4.2.2), welche weiterführend zur Überprüfung der Validität und Reliabilität (Abschnitt 4.2.3) herangezogen werden.

4.2.1 Erprobung und Verbesserungen

Die Erprobung des methodischen Vorgehens wurde mit Bauingenieur Daniel Talke (M. Sc.) und Maschinenbauingenieur Birger Buschmann (M. Sc.) vom TUM – Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion durchgeführt. Beide forschen im Rahmen ihrer Dissertation an additiven Fertigungsverfahren im Bauwesen und haben dadurch vertiefte Verständnisse der AMC-Zusammenhänge. Die Pilotierung wurde dabei konkret am SCA-Fertigungsverfahren mit dem Experten Daniel Talke umgesetzt und als fachlichen Experten zum methodischen Vorgehen von Birger Buschmann begleitet. Die Ergebnisse der Pilotierung spiegeln sich einerseits in den Arbeitsmodellen und dem verbesserten methodischen Vorgehen (Kapitel 3.2 und 4.1) sowie andererseits in den ausgefüllten Instrumentarien wider. Nach jeder konzeptionellen Anpassung und Optimierung wurden die Änderungen erneut pilotiert. Dadurch wurde eine Iteration von Pilotierung und Optimierung durchgeführt. Es ergaben sich folgende Veränderungen und ‚Lessons learned‘:

- Der Arbeitsablaufplan ist bzgl. der Ausdifferenzierung von Werkzeug zu Arbeits-/Betriebs- und Hilfsmittel erweitert worden, damit die FMEA-Integration Hand in Hand geht.
- Formulierungssammlungen sind zur einfacheren Handhabung erstellt worden.
- Die Videodokumentation der Prozessbeobachtung muss deutlich akribischer und lückenloser erfolgen, so dass Beobachtungen der Handlungen im Hintergrund reduziert werden.
- Für die Funktionsanalyse der FMEA muss eine konkrete Benennung der Outputs bzw. (Teil-)Ergebnisse der Arbeitssystemelemente erfolgen.
- Die Generierung der Arbeitssystemelemente ist mit einer schlüssigen Tätigkeitsbündelung und -strukturierung aus dem Arbeitsablaufplan verbunden.
- Ein Maschinenbaum ist zwingend notwendig, um die 3D-Fertigungsanlage mit ihren Komponenten schlüssig abzubilden, eine einheitliche Nomenklatur zu schaffen und diese für die FMEA heranziehen zu können.
- Ein Ishikawa-Diagramm ist für die FMEA im vorliegenden Kontext ungeeignet.
- Aufgrund der Adaption der FMEA war ein zweitägiger Workshop mit der externen Firma QMB-MA und dem Experten Michael Arend notwendig.
- Die Erhebung und Auswertung der FMEA entlang einer einfachen, tabellarischen Excel-Vorlage reicht nicht aus, um die Zusammenhänge vollumfänglich zu erschließen. Daher muss eine professionelle FMEA-Software (APIS) verwendet werden.
- Die Phase 0 des Ansatzes wurde mit dem 5Z-Projektplan der FMEA angereichert.

- Die Funktionsnetze sind für die weiteren Analysen irrelevant, da das Fehlernetz im vorliegenden Kontext umfangreichere, detailliertere Erkenntnisse liefert.
- Die Anpassung des Risikobewertungskataloges zur FMEA und die Erstellung des Handbuches erfolgten im Zusammenhang mit der Durchführung innerhalb der Pilotierung.

4.2.2 Pilotierungsergebnisse

Die Darstellung der Pilotierungsergebnisse folgt der Gliederung der Phasen des methodischen Vorgehens. Hierzu werden in Phase I (Abschnitt 4.2.2.1) die Ergebnisse zur Prozessstrukturierung und -systematisierung, in Phase II (Abschnitt 4.2.2.2) zur Fehler- und Risikoanalyse, in Phase III (Abschnitt 4.2.2.3) zur Kompetenzmatrix sowie in Phase IV (Abschnitt 4.2.2.4) zur Wissensarbeit und Informationsverarbeitung dargestellt und beschrieben.

4.2.2.1 Phase I: Prozessstrukturierung und -systematisierung

Ausgehend von Phase I zur Prozessstrukturierung und -systematisierung lässt sich der SCA-Fertigungsprozess der Pilotierung entlang eines Flow-Charts (Abbildung 39) mit den generierten Arbeitssystemen, deren Outputs und ablaufenden Zusammenhängen darstellen.

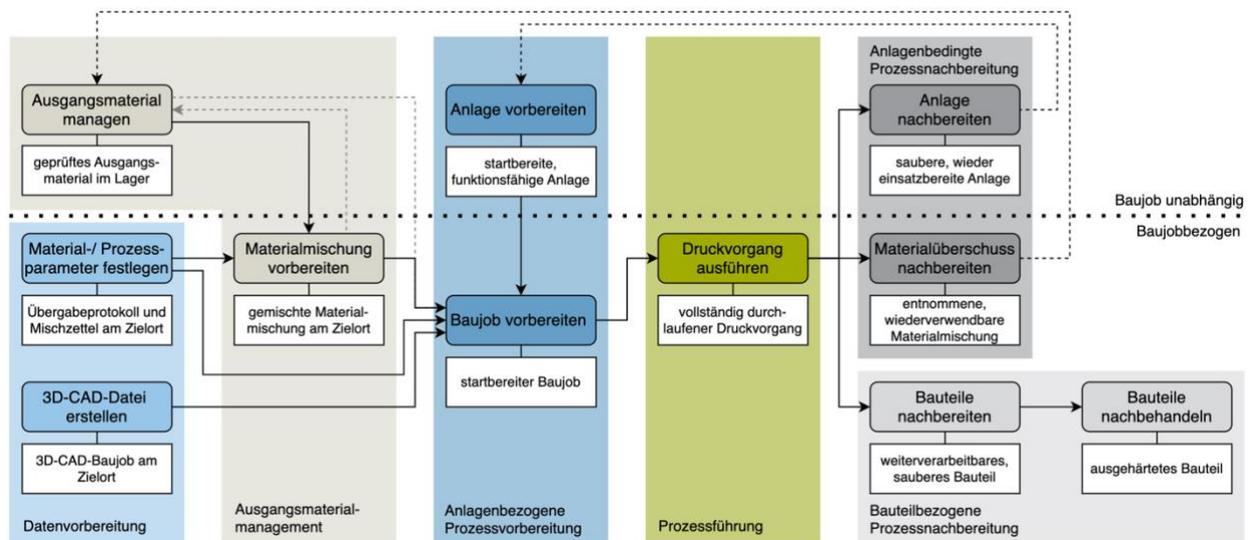


Abbildung 39: Prozesssystematisierung über Arbeitssysteme mit Outputs zum SCA-Fertigungsprozess (Pilotierung)

In der Datenvorbereitung werden die Volumenkörper in einer 3D-CAD-Software nach definierten Designrules konstruiert und diese im virtuellen Bauraum angeordnet. Mit dem Export der Datei ist der 3D-CAD-Baujob erstellt und wird anschließend an den Zielort übermittelt. Zudem werden die Material- und Prozessparameter über eine Excel-Tabelle festgelegt und die Daten in das Übergabeprotokoll sowie in den Mischzettel eingetragen. Im Rahmen des Ausgangsmaterialmanagements werden die Ausgangsmaterialien bestellt, der Materialeingang kontrolliert sowie das Lager entsprechend den spezifischen Materialanforderungen eingeräumt. Hinzu kommt das Vorbereiten einer neuen Materialmischung (bei Bedarf), wofür der Mischzettel und die Materialien im Lager benötigt werden. Die Vorbereitung der Materialmischung kann einerseits in unmittelbarem Anschluss an die festgelegten Material- und Prozessparameter erfolgen oder bei Standardmischungen auf Vorhalt hergestellt werden. Nachdem die Anlage gestartet ist und der

Modultest zum Überprüfen der Düsenfunktionsfähigkeit erfolgreich ausgeführt wurde, kann der Baujob vorbereitet werden. Hierzu werden anhand des Übergabeprotokolls die Materialmischung bereitgestellt und die baujobbezogenen Daten eingestellt. Mit der Erstellung einer Basisschicht im Bauraum ist der Baujob startbereit bzw. sind alle anlagenbezogenen Prozessvorbereitungen ausgeführt und der Druckvorgang kann ausgeführt werden. Im Druckvorgang selbst wird dieser von der Fachkraft überwacht bzw. beobachtet und – je nach Baujobgröße – der Materialfluss sichergestellt. Nachdem die letzte Schicht gedruckt wurde, verweilen die Bauteile bis zur Erreichung der Grünstandfestigkeit im Bauraum. Erst dann können diese entpackt und gesäubert werden. Säubern bedeutet hierbei zunächst, vorsichtig die nichtaktivierten Partikel von den aktivierten zu lösen, ohne das Bauteil zu beschädigen. Nach zwölf weiteren Stunden der Aushärtung kann das Bauteil fein gesäubert werden. Währenddessen werden der Materialüberschuss aus dem Bauraum und die Material- und Auffangbehälter entleert sowie in einem gesonderten Abfüllbehälter beschriftet zurück ins Lager gebracht. Zudem können die Anlage gesäubert und die Druckkopfdüsen gereinigt werden, so dass die nachbereitete Anlage wieder für den nächsten Druckvorgang einsatzbereit ist. Zur Nachbehandlung wird das Bauteil gewässert und 24 Stunden in einer Feuchteammer gelagert. Die vollständige Festigkeit erreicht das Bauteil nach 28 Tagen unter Lagerbedingungen nach DIN 1290-2.

Für die oben dargestellte Beschreibung zum SCA-Fertigungsprozess und die detaillierte Analyse und Auswertung (Tabelle 24) wurden im Arbeitsablaufplan insgesamt n = 239 Tätigkeiten – davon n = 119 Haupttätigkeiten (HT) und n = 120 vor- und nachbereitende Tätigkeiten (v-n-T) – expliziert. Zum Arbeitssystembaum wurden insgesamt n = 30 Sub-Arbeitssysteme (S-AS) und n = 11 Arbeitssysteme (AS) generiert.

Tabelle 24: Ergebnisse zur Prozessstrukturierung und -systematisierung des SCA-Fertigungsverfahrens (Pilotierung)

Relevanter Bereich der DIN SPEC 17071:2019	Tätigkeiten		S-AS	AS
	HT	v-n-T		
Datenvorbereitung	n = 35		n = 5	n = 2
	n = 20	n = 12		
Ausgangsmaterialmanagement	n = 74		n = 7	n = 2
	n = 27	n = 50		
Anlagenbezogene Prozessvorbereitung	n = 41		n = 5	n = 2
	n = 23	n = 18		
Prozessführung	n = 14		n = 2	n = 1
	n = 11	n = 3		
Anlagenbedingte Prozessnachbereitung	n = 47		n = 7	n = 2
	n = 21	n = 26		
Bauteilbezogene Prozessnachbereitung	n = 28		n = 4	n = 2
	n = 17	n = 11		

Auffällig ist hierbei, dass das Ausgangsmaterialmanagement durch die Vorbereitung der Materialmischung mit den meisten Tätigkeiten verbunden ist und hier eine hohe Anzahl an vor- und nachbereitenden Tätigkeiten zu vermerken ist. Aus den Haupttätigkeiten resultieren entsprechend viele Teilergebnisse, welche sich in der Anzahl der Sub-Arbeitssysteme widerspiegeln. Für die Systematisierung des Gesamtprozesses fließen diese sieben Teilerzeugnisse in nur zwei konkrete Ergebnisse (Arbeitssysteme) ein. Die Datenvorbereitung, die anlagenbezogene Prozessvorbereitung sowie die bauteilbezogene Prozessnachbereitung sind sowohl im Verhältnis der Haupttätigkeiten zu den vor- und nachbereitenden Tätigkeiten als auch in der Anzahl der Sub-Arbeitssysteme und Arbeitssysteme ähnlich. Auffällig ist, dass im Vergleich von anlagenbezogener Prozessvorbereitung zur anlagenbedingten Prozessnachbereitung die Anzahl an Haupttätigkeiten ähnlich ist, sich die Anzahl an vor- und nachbereitenden Tätigkeiten und den Sub-Arbeitssystemen jedoch deutlich unterscheidet. Dies begründet sich dadurch, dass bei der Nachbereitung der Materialüberschuss mit dem Abfüllen und Einlagern sowie die Reinigung der Anlage enthalten sind und damit wenig Haupttätigkeiten mit vielen Teilergebnissen – ähnlich zum Ausgangsmaterialmanagement – entstehen. Hervorzuheben ist zudem, dass innerhalb der Prozessführung nur ein Arbeitssystem generiert werden konnte und sich die insgesamt elf Haupttätigkeiten in zwei Sub-Arbeitssystemen – Überwachung bestimmter Parameter sowie Nachfüllen der Materialmischung – konzentrieren. Die Tätigkeiten des Arbeitsablaufplans können zudem unter verschiedenen Perspektiven (Tabelle 25) betrachtet und entsprechend ihrer Anzahl an Tätigkeiten gebündelt werden.

Tabelle 25: Betrachtungsperspektiven der Tätigkeiten des Arbeitsablaufplans

Betrachtungsperspektiven (BP)		Tätigkeiten	
		HT	v-n-T
1	Bauteilherstellung (exklusive Materialmischung vorbereiten)	n = 94	
		n = 59	n = 35
2	Bauteilvorbereitung	n = 52	
		n = 31	n = 21
3	Bauteilnachbereitung /-behandlung	n = 28	
		n = 17	n = 11
4	Materialvor- und -nachbereitung (exklusive Ausgangsmaterial managen)	n = 99	
		n = 36	n = 63
5	Anlagenvor- und -nachbereitung	n = 26	
		n = 13	n = 13

Die erste Perspektive (BP1) zeigt, dass n = 94 von den insgesamt n = 239 Tätigkeiten zur Herstellung des Bauteils – ausgenommen der Vorbereitung der Materialmischung – aufgebracht werden. Ein deutlicher Schwerpunkt liegt dabei in der Vorbereitung des Bauteils (BP2; n = 52) – der Erstellung des 3D-CAD-Baujobs, der Festlegung der Prozessparameter, dem Einstellen der Parameter und dem Erstellen der Basisschicht – im Vergleich zur Nachbearbeitung und

-behandlung des Bauteils (BP3; n = 28). Ein Großteil der beobachteten, explizierten Tätigkeiten zum SCA-Fertigungsprozess bezieht sich aktuell auf die Vor- und Nachbereitung der Materialmischung (BP4; n = 99), wobei hier die vor- und nachbereitenden Tätigkeiten einen deutlichen Akzent setzten. Die Anlagenvor- und -nachbereitung (BP5) die zu einem Baujob ausgeführt wird, stellt mit insgesamt n = 26 Tätigkeiten einen geringen Anteil im Gesamtprozess dar.

4.2.2.2 Phase II: Fehler- und Risikoanalyse

Innerhalb der Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse wurden die Funktionen und Fehlfunktionen innerhalb der Untersuchungsgebiete (Tabelle 26) erhoben. Hierzu wurden bei den Bauteileigenschaften insgesamt n = 6, bei den Prozessauswirkungen n = 34, auf Fehlerartenebene (Arbeitssystemebene) n = 86 sowie auf Ursachenebene (5M-Prozesseinflüssen) n = 274 Funktionen und Fehlfunktionen dokumentiert.

Tabelle 26: Gesamtübersicht der Funktionen und Fehlfunktionen des SCA-Fertigungsprozesses

Art	Bauteileigenschaften	Prozessauswirkung	Fehlerart (Arbeitssystem)	Fehlerursachen (5M-Prozesseinflüsse)
Funktionen	n = 2	n = 5	n = 28	n = 127
Fehlfunktionen	n = 4	n = 29	n = 58	n = 147 (45)

Wie aus Tabelle 26 hervorgeht, sind innerhalb der Fehlfunktionen zu den 5M-Prozesseinflüssen (n = 102; n = 45 mit ‚Keine‘ abgeleitet und daher ausgenommen) die meisten Fehlfunktionen zu verorten. Die Verteilung dieser im Gesamtprozess (Abbildung 40) zeigt, dass der Mensch (n = 48) knapp die Hälfte der Fehler verursacht und damit einen deutlichen Akzent setzt. Darauf folgen Maschinenfehlfunktionen mit n = 21. Abbildung 40 zeigt auch, dass ähnlich viele Ursachen im SCA-Fertigungsprozess auf Fehler in der Mitwelt (n = 15) und in der Methode (n = 13) zurückzuführen sind. Den geringsten Anteil bilden hierbei die Material-Fehlerursachen (n = 5).

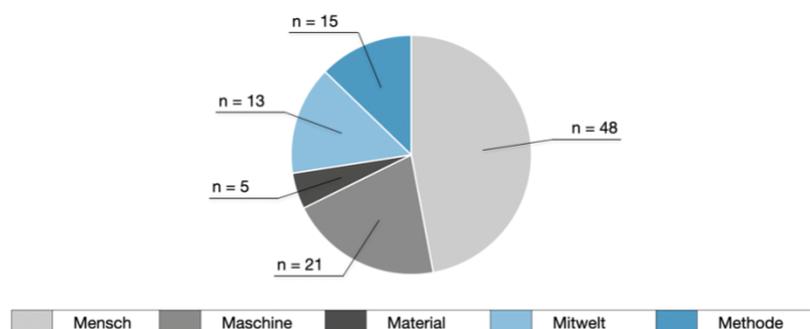


Abbildung 40: Verteilung der Ursachen-Fehlfunktionen der 5M-Prozesseinflüsse im Gesamtprozess

Abbildung 41 zeigt, wie sich diese 5M-Ursachen in den jeweiligen Arbeitssystemen darstellen.

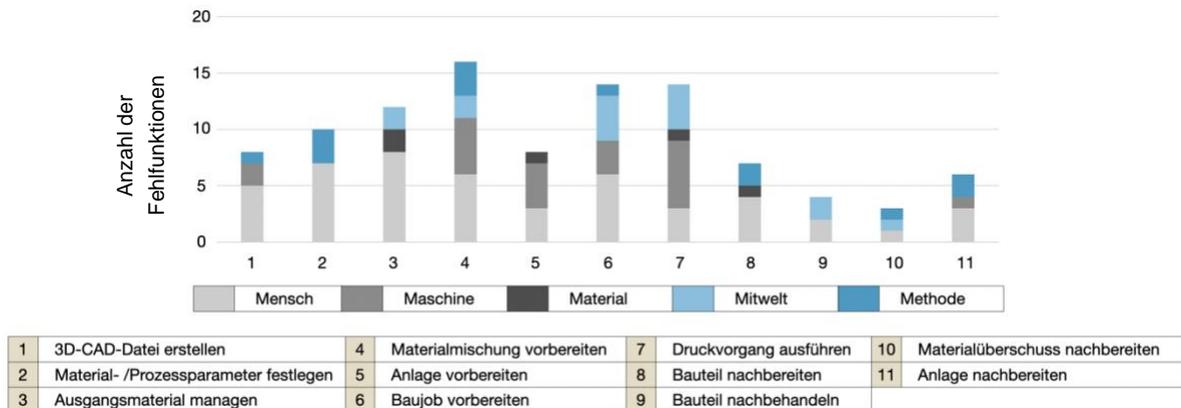
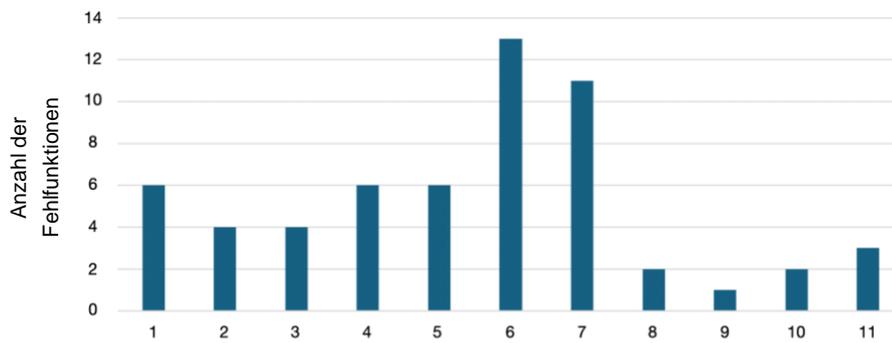


Abbildung 41: Verteilung der Fehlerursachen in den Arbeitssystemen

Aus dieser Darstellung geht hervor, dass die meisten Fehlfunktionen des Menschen im Ausgangsmaterialmanagement (3, 4) und in der Datenvorbereitung (1, 2) zu verorten sind. Weiter wird deutlich, dass die Maschinenfehlfunktionen insbesondere der Vorbereitung der Materialmischung (4) und der Anlage (5) sowie unmittelbar dem Druckvorgang (7) zugeordnet sind. Die Material-Fehlfunktionen treten bei den einzelnen Materialien im ‚Ausgangsmaterial managen‘ (3) auf, bezüglich des Wassers in ‚Anlage vorbereiten‘ (5) und mit der Verarbeitbarkeit der Materialmischung im Druckvorgang sowie der Grünstandfestigkeit beim Entpacken des Bauteils (8). Die Fehlfunktionen der Mitwelt fließen überwiegend mit den Umgebungseinflüssen in die Vorbereitung des Baujobs (6) und in den Druckvorgang (7) ein, wobei diese auch im Ausgangsmaterialmanagement (2, 3) und der Nachbehandlung des Bauteils (9) von Bedeutung sind. Die Methode ist insbesondere bei der Festlegung der Material- und Prozessparameter (2), im Mischvorgang (4), bei der Vorbereitung des Baujobs (6) und dem Entpacken des Bauteils (8) sowie bei der Düsenreinigung (11) ausschlaggebend. Hinsichtlich der Anlagen ist eine Auffälligkeit zu nennen, da hier die Maschine größtenteils in der Vor- (5) und die Methodik nur in der Nachbereitung (11) wiederzufinden ist. Dies begründet sich durch die Anforderung an einsatzbereite und funktionsfähige Maschinenkomponenten sowie deren Reinigungsmethoden in der Nachbereitung.

In Anbetracht der Anzahl an Fehlfunktionen wird dabei eine Anhäufung in der Vorbereitung der Materialmischung (3) deutlich, da hier mehrere Ursachen in ihrer Summe zusammenfließen. Gleiches ist bei der Vorbereitung des Baujobs (6) und dem Druckvorgang ausführen (7) festzustellen. Aus Abbildung 41 wird zudem ersichtlich, dass zur Prozessvorbereitung (1–6) mehr Fehlfunktionen dokumentiert wurden als zur Prozessnachbereitung (8–11). Diese Gewichtung lässt sich dabei ebenfalls innerhalb der Arbeitssystem-Fehlfunktionen ($n = 58$) feststellen (Abbildung 42).

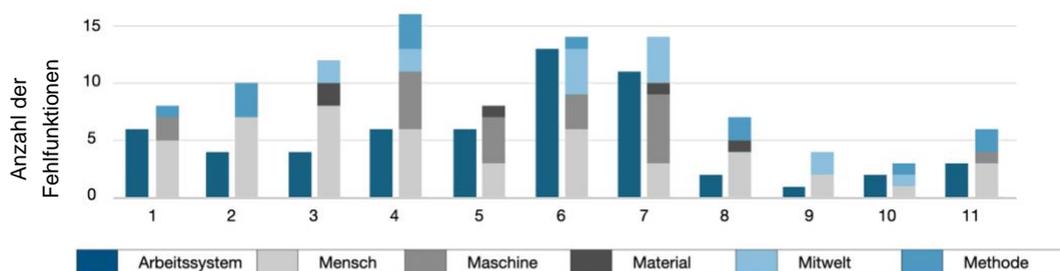


1	3D-CAD-Datei erstellen	4	Materialmischung vorbereiten	7	Druckvorgang ausführen	10	Materialüberschuss nachbereiten
2	Material- /Prozessparameter festlegen	5	Anlage vorbereiten	8	Bauteil nachbereiten	11	Anlage nachbereiten
3	Ausgangsmaterial managen	6	Baujob vorbereiten	9	Bauteil nachbehandeln		

Abbildung 42: Verteilung der Fehlfunktionen der Arbeitssystemebenen im Gesamtprozess

Im direkten Verhältnis der Bauteilvorbereitung (1, 2, 6; $n = 23$) zur Bauteilnachbereitung (8, 9; $n = 3$) ist hier ebenfalls ein deutlicher Schwerpunkt in der Vorbereitung erkennbar. Die Verteilung zeigt zudem, dass die meisten Fehlfunktionen in der Baujobvorbereitung (6; $n = 13$) sowie im Druckvorgang (7; $n = 11$) verortet sind. Dies bedeutet, dass hier besondere Anforderungen an den Arbeitssystem-Output gestellt werden. Eine weitere Auffälligkeit ergibt sich aus dem Verhältnis der Anlagenvorbereitung (5; $n = 6$) zur Anlagennachbereitung (11; $n = 3$). Mit der Sicherstellung der Funktionsfähigkeit für den darauffolgenden Druckvorgang bestehen hierbei in der Vorbereitung ebenfalls höhere Anforderungen an den Output. Vor dem Hintergrund der Vielzahl an Tätigkeiten zur Materialmischungsvorbereitung (4; $n = 6$) und Überschussnachbereitung (10; $n = 2$) sind die Anforderungen an die Ergebnisse deutlich geringer, deren Verhältnis zueinander jedoch nachvollziehbar, da in der Vorbereitung zusätzliche Anforderungen zur Herstellung der Materialmischung hinzukommen. Das Managen der Ausgangsmaterialien (3) gilt es im Gesamtprozess mit $n = 4$ nicht unbeachtet zu lassen.

Werden die Ursachen- und Arbeitssystem-Fehlfunktionen (Abbildung 43) gegenübergestellt, lassen sich weitere Zusammenhänge verdeutlichen.



1	3D-CAD-Datei erstellen	4	Materialmischung vorbereiten	7	Druckvorgang ausführen	10	Materialüberschuss nachbereiten
2	Druck-/ Mischdaten festlegen	5	Anlage vorbereiten	8	Bauteil nachbereiten	11	Anlage nachbereiten
3	Ausgangsmaterial managen	6	Baujob vorbereiten	9	Bauteil nachbehandeln		

Abbildung 43: Gegenüberstellung der Ursachen- und Arbeitssystem-Fehlfunktionen in den Arbeitssystemen

Abbildung 43 zeigt, dass insbesondere in der Festlegung der Material- und Prozessparameter (2), dem Managen des Ausgangsmaterials (3), der Vorbereitung der Materialmischung (4) sowie der Nachbereitung (8) und Nachbehandlung (9) des Bauteils viele Ursachen-Fehlfunktionen im Vergleich zu den Arbeitssystem-Fehlfunktionen vorhanden sind. Das bedeutet, dass durch dieses Verhältnis wenig Anforderungen an die Arbeitssystem-Outputs mit vielen möglichen Ursachenfehlern verbunden sein können. Diese Zusammenhänge werden unmittelbar im Fehlfunktionsnetz (Abbildung 44) deutlich.

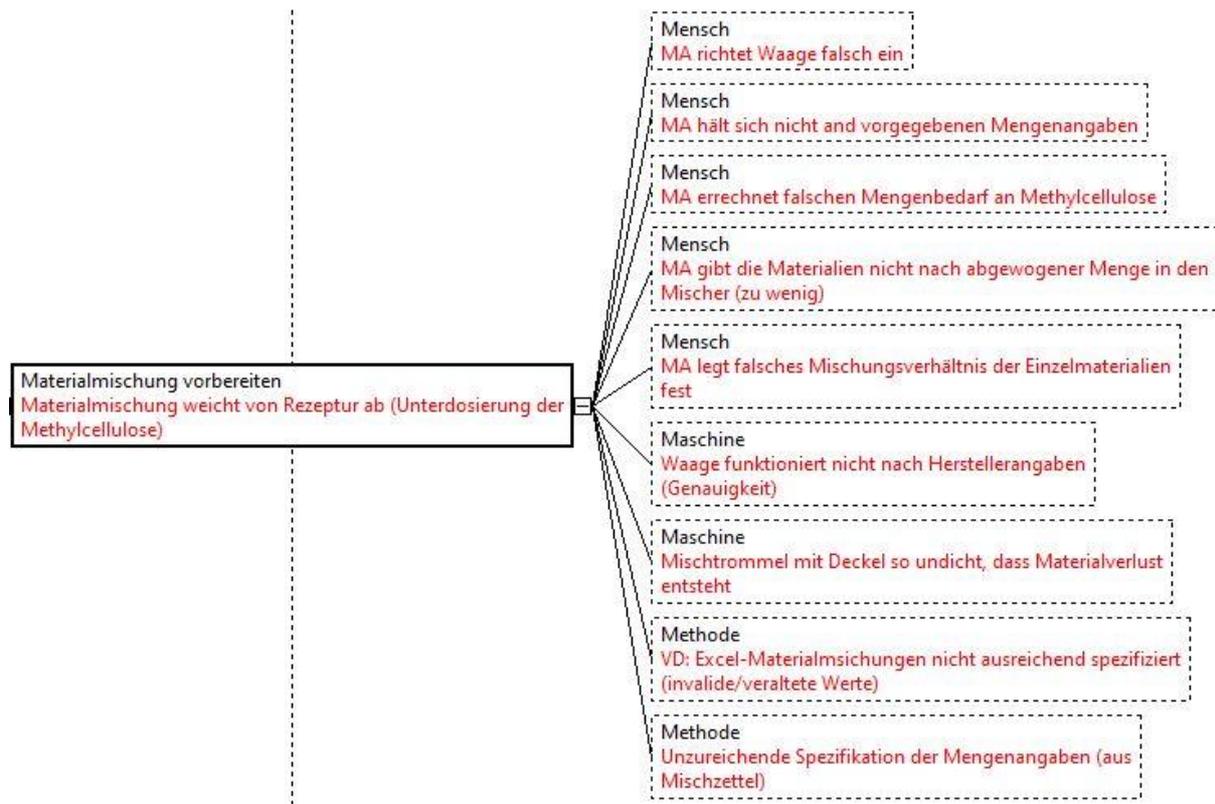


Abbildung 44: Auszug aus dem Fehlernetz zum Arbeitssystem: Materialmischung vorbereiten

Dennoch zeigen sich in den Fehlernetzen anderer Arbeitssysteme (Abbildung 45) mit ausgewogenem Verhältnis, dass partiell mehrere Fehlfunktionen der Ursachen in den Arbeitssystem-Fehlfunktionen zusammenfließen können. Dies begründet sich dadurch, dass sowohl die Maschinenkomponenten als auch die Mitwelt und Methode mehrmals Einflüsse auf die Arbeitssystem-Fehlfunktionen haben können.

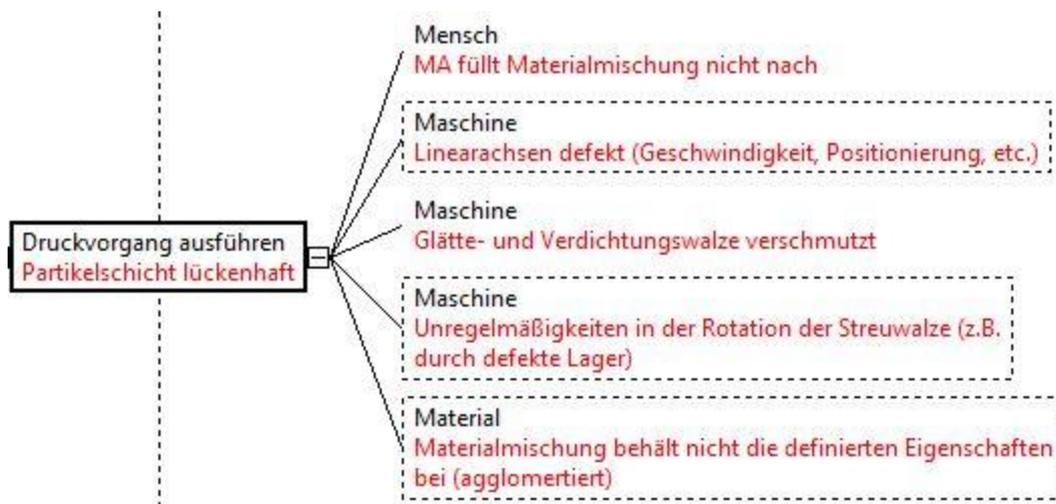


Abbildung 45: Auszug aus dem Fehlernetz zum Arbeitssystem: Druckvorgang ausführen

Diese Zusammenhänge aus Fehlerursache und Fehlerart wurden entsprechend mit den erschlossenen Fehlfunktionen der Prozessauswirkung verbunden und entlang der vorgegebenen Funktionskategorien (Tabelle 27) dokumentiert. Die $n = 58$ Arbeitssystem-Fehlfunktionen münden in $n = 29$ Prozessauswirkungen. Das bedeutet, dass hier mehrere Fehlerarten gleiche Fehlerfolgen herbeiführen.

Tabelle 27: Verteilung der Fehlfunktionen zur Prozessauswirkung

Prozessabbruch	Prozesspause	Prozessdurchlauf	Auswirkung auf Folgedruck	Außerhalb der Betrachtung
$n = 6$	$n = 6$	$n = 12$	$n = 4$	$n = 1$

Die Ergebnisse zeigen, dass jeweils $n = 6$ mögliche Fehler im Prozess zu einem Abbruch sowie zu einer Pausierung führen. Im Prozessabbruch sind beispielsweise Fehlfunktionen enthalten, bei dem Bauteilbereiche außerhalb des druckbaren Bereichs liegen oder der Druck aufgrund fehlender Materialmischung oder Wassers nicht weitergeführt werden kann und durch diese Verzögerung der Schichtverbund beeinträchtigt wird. Beispiele zur Prozesspause sind, dass die Materialmischung nicht angemischt werden kann oder im Druckvorgang Lücken im Partikelbett sichtbar sind, welche bei frühzeitiger Erkennung manuell nachgebessert werden. Bei $n = 12$ der $n = 29$ möglichen Fehlern läuft der Prozess weiter. Diese Fehlfunktionen wurden entsprechend weiter mit den Fehlfunktionen der Bauteileigenschaften verbunden. Auffällig sind hierbei zwei Prozessauswirkungen, da hier viele Arbeitssystem-Fehlfunktionen zusammenfließen. Erste Auffälligkeit 1 (Abbildung 46) zeigt die mögliche Prozessauswirkung, dass das Bauteil mit einem falschen Material hergestellt wird. Dieser Fehler kann aus vier unterschiedlichen Arbeitssystemen entstehen und ist mit $n = 12$ Fehlfunktionen verbunden. Zweite Auffälligkeit ist in der Prozessauswirkung ‚Bauteil wird mit falschen Prozessparametern gedruckt‘ (Abbildung 47). Hier

fließen insbesondere die Fehlfunktionen⁹ aus der Bauteilvorbereitung und dem Druckvorgang ein. Der Fehler kann aus drei unterschiedlichen Arbeitssystemen entstehen und ist mit $n = 14$ Fehlfunktionen verbunden. In beiden Fällen ist das Bauteil bezüglich den Materialeigenschaften und der Geometrie unbrauchbar.

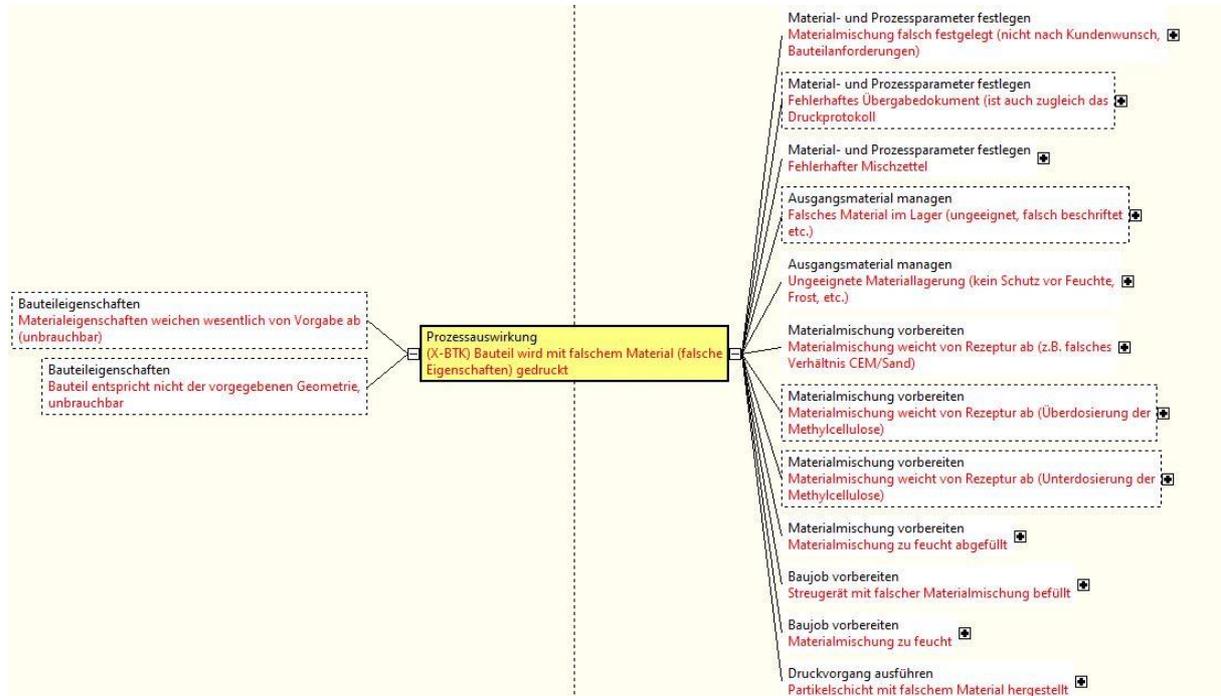


Abbildung 46: Auszug aus dem Fehlernetz zu den Prozessauswirkungen (Auffälligkeit 1)

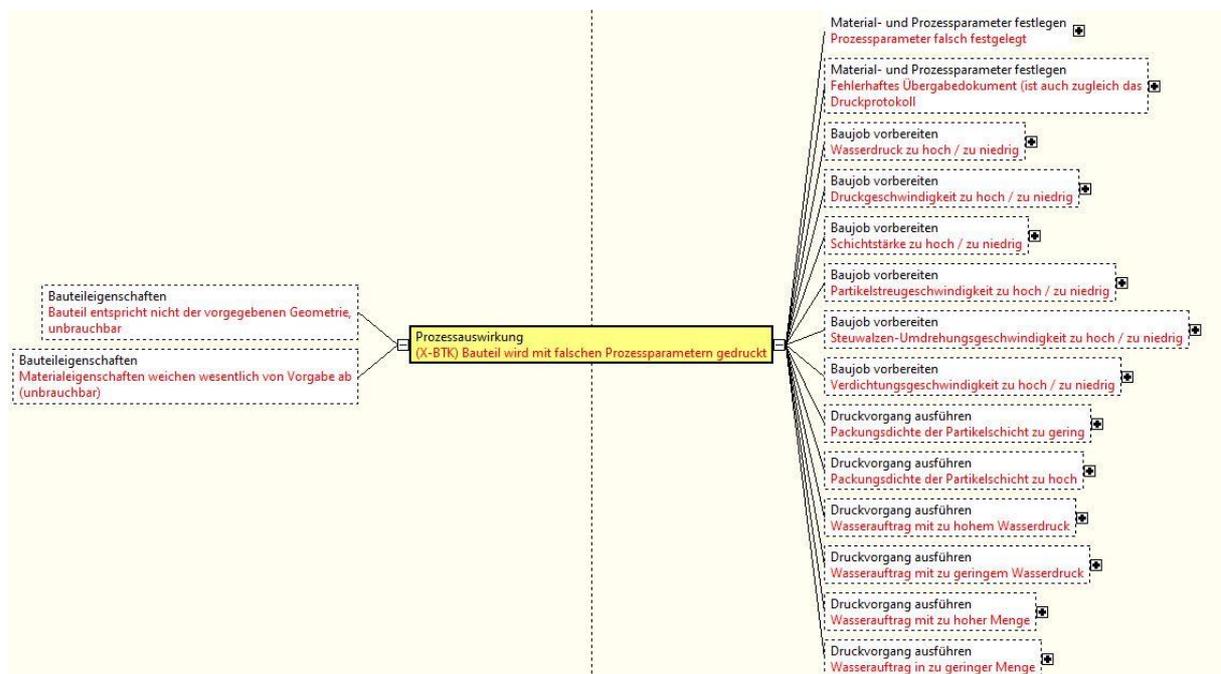


Abbildung 47: Auszug aus dem Fehlernetz zu den Prozessauswirkungen (Auffälligkeit 2)

⁹ Die Ursachen der Fehlfunktionen zu ‚Baujob vorbereiten‘ (zu hoch/ zu niedrig) sind auf gleiche Ursachen zurückzuführen und wurden aufgrund dessen zusammengefasst. Dies stellt sich im ‚Druckvorgang ausführen‘ anders dar und sind deshalb ausdifferenziert.

N = 4 Fehlfunktionen der Prozessauswirkung haben eine Auswirkung auf den Folgedruck. Dies zeigt sich exemplarisch dadurch, dass nach unzureichender Säuberung der Anlage Materialreste vorhanden sind und diese den Folgedruck negativ beeinflussen (Kontamination) oder die Düsen aufgrund falscher oder unzureichender Reinigung im nächsten Druck nicht einsatzbereit sind. Eine weitere Fehlfunktion liegt außerhalb der Betrachtung, da sich diese auf das Füllen des Lagers mit unbrauchbaren Materialien bezieht.

Ausgehend von den Fehlfunktionsnetzen wurden in den Formblättern zur FMEA insgesamt n = 274 Vermeidungs- und Entdeckungsmaßnahmen dokumentiert und entlang des Risikobewertungskatalogs bewertet. Die Maßnahmen-Ergebnisse werden hierbei entlang einer Kategorisierung¹⁰ und deren entsprechenden Anzahl an Vorkommnissen (Tabelle 28) zusammengefasst.

Tabelle 28: Kategorisierung der Ergebnisse zu Vermeidungs- und Entdeckungsmaßnahmen

Vermeidungsmaßnahmen		Entdeckungsmaßnahmen	
Schulungen des Personals	n = 50	Offensichtliche Erkennung	n = 38
Spezielle Prozessmaßnahmen	n = 16	Prüfung, Kontrolle	n = 44
Etabliertes Verfahren, Methode	n = 2	Feedback im Prozess	n = 3
Keine	n = 6	Keine	n = 7
Regelmäßige Säuberung, Prüfung und/oder Wartung	n = 7		
Dokumentationen und Arbeitsplatzeinrichtung	n = 12		

Die Ergebnisse zeigen, dass die häufigste Vermeidung von Fehlern über die Schulung des Personals (n = 50) erfolgt. Hierzu zählen spezifische und allgemeine Schulungen, Einweisungen sowie das Ausführen der Arbeit durch geschultes Personal. Eine weitere Möglichkeit zur Vermeidung von Fehlern zeigt sich in speziell auf den Prozess ausgerichteten Maßnahmen (n = 16), wie z. B. Verwendung definierter Programme und hochwertiger Komponenten, oder auch der Schaffung von geeigneten Räumlichkeiten und Bedingungen. Hinzu kommen die Durchführung von regelmäßigen Säuberungen, Prüfungen und/oder Wartungen (n = 7). Zudem wird auf etablierte Verfahren oder Methoden zurückgegriffen (n = 2). In n = 6 Fällen liegen keine Vermeidungsmaßnahmen vor, welche entsprechend mit der höchsten Risikobewertung vermerkt wurden. Fehlervorbeugend sollen entsprechende Dokumentationen und die Einrichtung des

¹⁰ Um die Richtigkeit der Anzahl an aktuell vorhandenen Vermeidungs- und Entdeckungsmaßnahmen zu gewährleisten, wurde das Vorkommen mehrerer, gleicher Ursachen-Fehlfunktionen (Überschneidungen aus Maschine, Mitwelt und Methode) ausgenommen, so dass jede Ursachen-Fehlfunktion nur einmal mit ihrer Vermeidungs- und Entdeckungsmaßnahme dokumentiert ist. Zudem wurden die Nennung mehrerer Vermeidungs- oder Entdeckungsmaßnahmen zu einer Ursache-Fehlfunktion aufgeteilt und Einzeln aufgelistet. Nach dieser Filterung fließen n = 93 Vermeidungsmaßnahmen und n = 92 Entdeckungsmaßnahmen in die kategorische Darstellung ein.

Arbeitsplatzes (n = 12) sein. Bei den Entdeckungsmaßnahmen sind die offensichtliche Erkennung des Fehlers (n = 38) sowie die Entdeckung bei Prüfung und Kontrolle (n = 44) dominierend. Weiter werden Fehler über das Feedback im Prozess (n = 3) entdeckt. Das bedeutet, dass die ausführende Person bei Unstimmigkeiten bei entsprechenden Kollegen oder Experten nachfragt. In n = 7 Fällen liegt keine Entdeckungsmaßnahme vor.

Aus der Risikobewertung errechnet die Software automatisiert die Risikoprioritätszahl¹¹ und legt die Aufgabenpriorität fest. In den Formblättern zu den Arbeitssystemen wurden die Fehlerzusammenhänge dabei insgesamt n = 27 mit Hoch, n = 62 mit Mittel und n = 39 mit Niedrig eingestuft. Ausgehend von dieser Aufgabenpriorität (Abbildung 48) können die Experten den Prozess entsprechend verbessern.

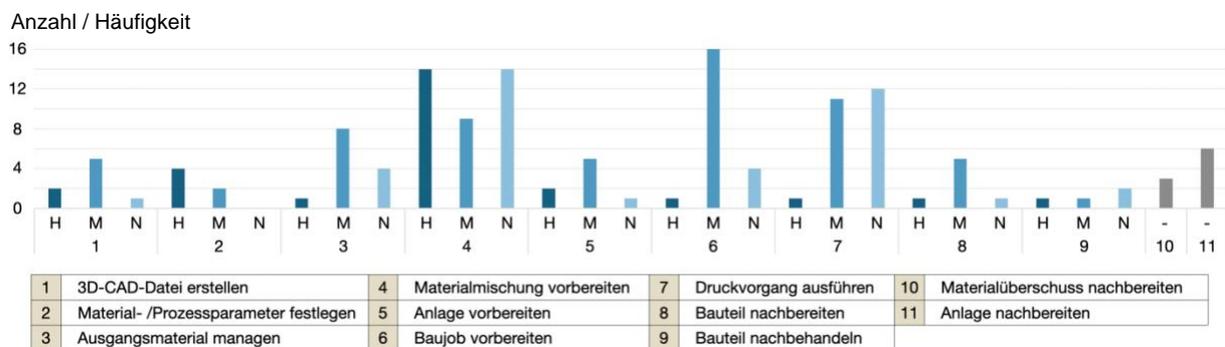


Abbildung 48: Risikobewertung über die Aufgabenpriorität entlang der Arbeitssysteme

Die Ergebnisse zeigen, dass insbesondere in der Vorbereitung der Materialmischung (4) und auch in der Festlegung der Druck- und Materialparameter (2) Optimierungsbedarf besteht. In der Vorbereitung des Baujobs (6) und im Druckvorgang (7) überwiegt die mittlere Aufgabenpriorität. In Anbetracht der bisher dargestellten Ergebnisse ist deren Bewertung und die Senkung der Priorität für die Experten essenziell, jedoch im weiteren Verlauf für die Generierung und Analyse von Kompetenzanforderungen nicht relevant.

4.2.2.3 Phase III: Kompetenzanalyse/-generierung

Zur Kompetenzanalyse /-generierung entlang der Kompetenzmatrix wurden die Arbeitssysteme entsprechend deren Anzahl in n = 11 berufliche Handlungen überführt und insgesamt n = 314 Wissensaspekte identifiziert. Das korrespondierende Wissen gliedert sich dabei in Sachwissen (SW; n = 240), Prozesswissen¹² (PW; n = 28) und Reflexionswissen (RW; n = 46). Die Verteilung der Wissensaspekte bezüglich Prozesswissen und Reflexionswissen ist hierbei hervorzuheben, da dies bedeutet, dass weniger die Handhabungen, sondern viel mehr die Verständniszusammenhänge im SCA-Fertigungsprozess von Bedeutung sind.

¹¹ Da die RPZ nur eine bedingte Aussagekraft hat und durchaus in Kritik steht, wird die Aufgabenpriorität fokussiert.

¹² Zur Anzahl an Wissensaspekten zum Prozesswissen wurden die Aspekte erster Ebene verwendet. Die Aspekte zweiter Ebene stellen lediglich ergänzende, vertiefende Anhaltspunkte zur beruflichen Handlungssequenz dar und würden damit die Aussagekräftigkeit der Anzahl negativ beeinflussen.

Abbildung 49 zeigt die Verteilung der korrespondierenden Wissensaspekte zu den jeweiligen beruflichen Handlungen.

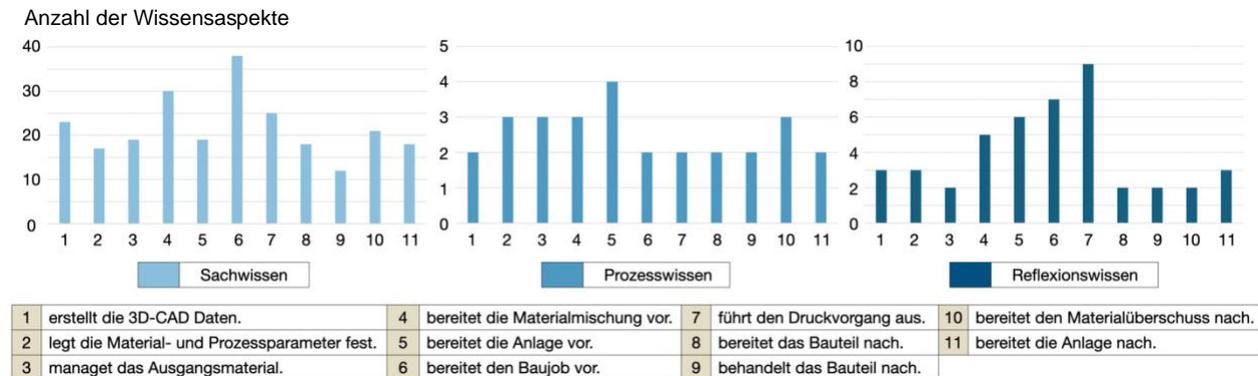


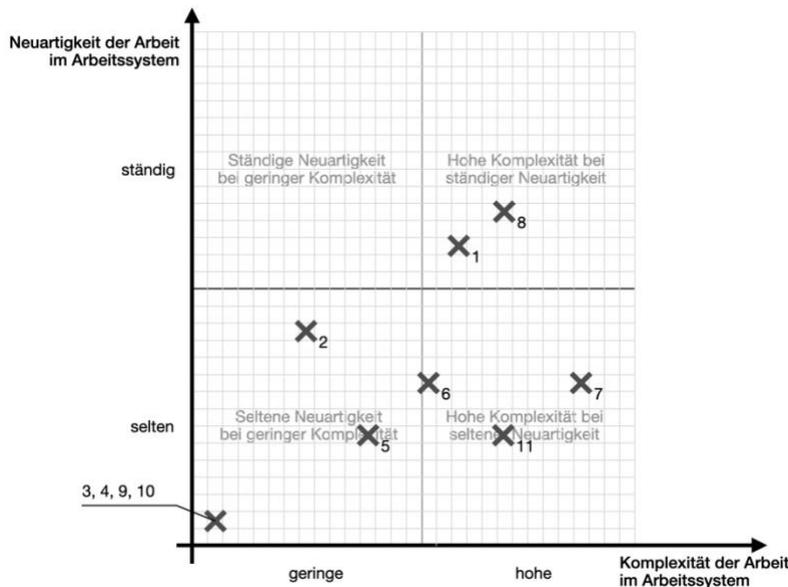
Abbildung 49: Verteilung der Wissensaspekte innerhalb der beruflichen Handlungen

Die Ergebnisse bezüglich der Anzahl und Verteilung an Wissensaspekten zum Sachwissen (SW) sind bedingt zu betrachten, da diese durch die Gruppierungen und die Auflistung von Anlagenelementen – welche u. a. wiederum in ihren Gruppierungen dokumentiert wurden – variieren kann, jedoch sinngemäß korrekt sind und bei Bedarf (weniger) detailliert aufgelistet werden könnten. Aus diesem Grund ist die Beschreibung von Korrelationen zwischen Sach- und Prozesswissen schwierig und würde lediglich Vermutungen aufzeigen. Dennoch lassen sich hierbei zwei Akzentuierungen hinsichtlich der Vorbereitung der Materialmischung (SW-4) und des Baujobs (SW-6) sowie ein Tief bei der Bauteilnachbehandlung (SW-9) feststellen. Die Wissensaspekte zum Prozesswissen (PW) stellen sich hingegen ausgewogen dar. Hierbei ist auffällig, dass die Vorbereitung der Anlage (PW-5) mit den meisten beruflichen Handlungssequenzen verbunden ist. Bezüglich des Reflexionswissens (RW) ist eine kontinuierliche Steigerung der Verständniszusammenhänge bis hin zum Ausführen des Druckvorgangs zu verzeichnen. Innerhalb der anlagenbedingten Prozessnachbereitung (RW-10, RW-11) sowie der bauteilbezogenen Nachbereitung (RW-8, RW-9) sind wiederum deutlich weniger RW-Wissensaspekte festzustellen. Im Zusammenhang von Prozesswissen zu Reflexionswissen zeigt sich, dass insbesondere bei der Baujobvorbereitung (6) und dem Druckvorgang (7) wenige Handlungssequenzen mit vielen Verständniszusammenhängen aufeinandertreffen. Das Managen der Ausgangsmaterialien (3) hingegen ist im Vergleich der Prozesswissensaspekte mit wenig Reflexionswissensaspekten hinterlegt.

4.2.2.4 Phase IV: Wissensarbeit und Informationsverarbeitung

Mit Phase IV wurden 1) der Grad an potenziell enthaltener Wissensarbeit in den Arbeitssystemen erhoben, 2) das auftretende Arbeitssystem der Fehler der Prozessauswirkungen in den Fehlfunktionen dokumentiert sowie 3) die Informationsmärkte der Ursachen-Fehlfunktionen erschlossen und in einem Fehlerkatalog zusammengeführt.

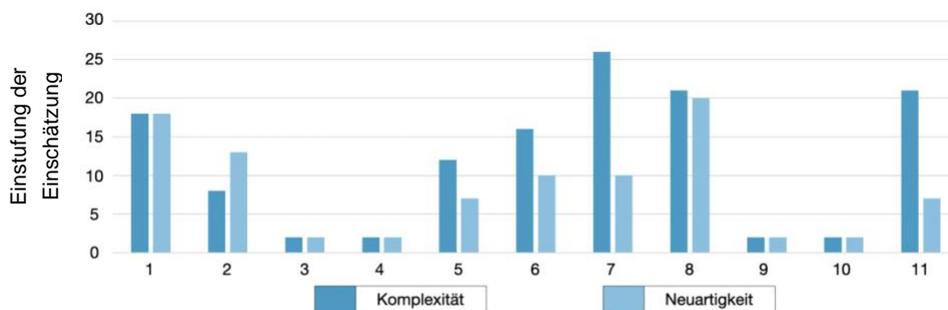
1) Um den Grad an potenziell enthaltener Wissensarbeit in den Arbeitssystemen zu bestimmen, wurde dem Experten die Vierfeldertafel nach Hube zur Einschätzung vorgelegt (Abbildung 50). Den Einschätzungen nach fallen die Arbeitssysteme:



Material- /Prozessparameter festlegen (2), Ausgangsmaterial managen (3), Materialmischung vorbereiten (4), Anlage vorbereiten (5), Bauteil nachbehandeln (9) sowie Materialüberschuss nachbereiten (10) in den Bereich ‚Wissensarbeit in Einzelfällen‘. Baujob vorbereiten (6), Druckvorgang ausführen (7) und Anlage nachbereiten (11) in den Bereich ‚Hohe Komplexität bei seltener Neuartigkeit‘ und 3D-CAD-Datei erstellen (1) sowie Bauteil nachbereiten (8) in den ‚Originären Bereich von

Abbildung 50: Einschätzung des Experten zum Grad an potenziell enthaltener Wissensarbeit in den Arbeitssystemen

Wissensarbeit‘. Kein Arbeitssystem wurden in ‚Ständige Neuartigkeit bei geringer Komplexität‘ zugeordnet. Da die Vierfeldertafel mit einem Raster aus 30x30 Kästchen versehen ist, können die Einschätzungen der Experten numerisch überführt und hinsichtlich der Komplexität und Neuartigkeit je Arbeitssystem grafisch aufbereitet und gegenübergestellt werden (Abbildung 51).



1	3D-CAD-Datei erstellen	4	Materialmischung vorbereiten	7	Druckvorgang ausführen	10	Materialüberschuss nachbereiten
2	Material- /Prozessparameter festlegen	5	Anlage vorbereiten	8	Bauteil nachbereiten	11	Anlage nachbereiten
3	Ausgangsmaterial managen	6	Baujob vorbereiten	9	Bauteil nachbehandeln		

Abbildung 51: Ergebnis zu Einschätzung der Komplexität und Neuartigkeit der Arbeit in den Arbeitssystemen

Die Darstellung zeigt, dass die Komplexität in der Vorbereitung der Anlage (5), des Baujobs (6) und im Druckvorgang (7) zunimmt. Im Vergleich zu den bisherigen Ergebnissen ist auffällig, dass die Erstellung der 3D-CAD-Datei (1) das Nachbereiten des Bauteils (8) sowie der Anlage (11) als deutlich komplexer eingeschätzt werden. Hinsichtlich (1) und (2) besteht ein enger Zusammenhang mit der Neuartigkeit der Arbeit, welche sich insbesondere durch die Herstellung neuartiger und individueller Geometrien bemerkbar macht. Die Einschätzung zur Komplexität von (11) begründet der Experte durch die Säuberung der Düsen. Bei der Festlegung der Material- und Prozessparameter (2) ist die Neuartigkeit stärker ausgeprägt als die Komplexität, da dieser aktuell durch die Verwendung von Tabellen zur Bestimmung der Parameter und einer begrenzten

Anzahl an Möglichkeiten begegnet wird. In den anderen Arbeitssystemen (5, 6, 7, 11) zeigt sich die Neuartigkeit deutlich geringer ausgeprägt. Dies steht dabei in Zusammenhang mit routinierten Vorgehensweisen sowie mit der mittleren bis niedrigen Auftretenswahrscheinlichkeit möglicher Fehler.

2) Da die Fehlfunktionen der Prozessauswirkung bisher ‚nur‘ erweiterte Erklärungen zu den Fehlerfolgen der Arbeitssystem-Fehlfunktionen liefern, ist für die Informationsverarbeitung von Relevanz, in welchem Arbeitssystem diese potenziellen Fehler auftreten. Dabei kann unter anderem der Fall eintreten, dass der Fehler erst bei einer Bauteil-Endkontrolle (X) bemerkbar wird. Zur Darstellung werden die Ergebnisse in den jeweiligen Arbeitssystemen (Abbildung 52) zusammengetragen.

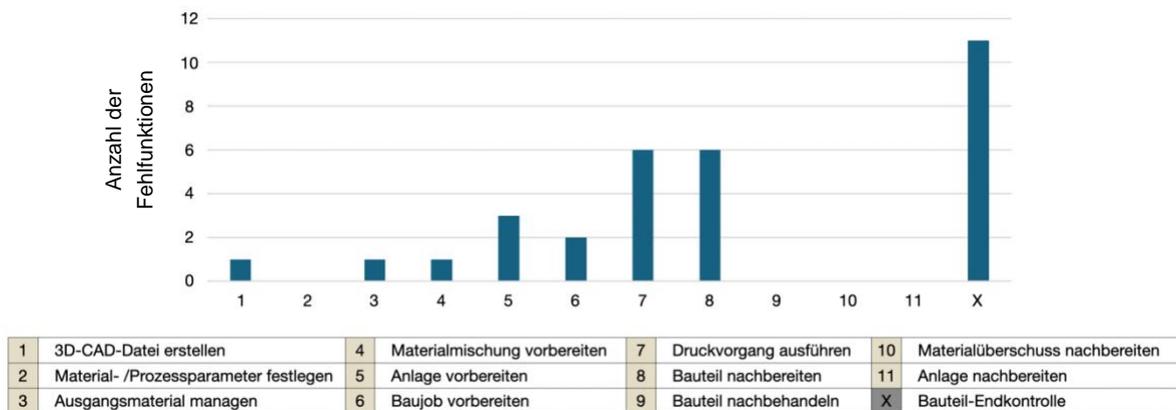


Abbildung 52: Ergebnisse zum Fehlerauftreten in den Arbeitssystemen

Die Ergebnisse zeigen, dass in den vorbereitenden Arbeitssystemen (1–6) wenige Fehler der Prozessauswirkung und ein Großteil dieser im Druckprozess (7), der Bauteilnachbearbeitung (8) und vor allem in einer Bauteil-Endkontrolle (X) auftreten. Vor dem Hintergrund der Sicherung der operativen Handlungsfähigkeit bedeutet dies, dass die Fachkraft vermehrt mit möglichen Fehlern im Druckprozess (7) und in der Bauteilnachbearbeitung (8) konfrontiert werden kann und bei Eintritt insbesondere im Druckprozess Ad-hoc-Handlungen ausführen bzw. -Entscheidungen treffen muss.

3) Da das fehlerauftretende Arbeitssystem dokumentiert und mit den potenziellen Fehlern verknüpft wurde, ist mit den Ergebnissen eine Nachverfolgung der Fehlerkette bis zur Ursache möglich. Dabei wurde zusammen mit den erhobenen Informationsmärkten und der Umsetzung des erweiterten Arbeitsmodells (Abschnitt 3.2.2 und Abschnitt 4.1.5) ein Fehlerkatalog (siehe Tabelle 23) erstellt, welchen die Fachkraft bei einer möglichen Unwissenheit im Fehlerauftreten heranziehen kann. Das Ergebnis zum Fehlerkatalog (Tabelle 29) wurde zu den oben genannten $n = 8$ Arbeitssystemen (inklusive Bauteil-Endkontrolle) erstellt. Hierzu wurden jeweils die möglichen Fehlfunktionen der Prozessauswirkung (FP; $n = 31$), die unterschiedlichen Arten an Fehler-Arbeitssystemen (FA; $n = 25$), die relevanten Fehlfunktionen (FF; $n = 62$), die unterschiedlichen Arten an Informationsmärkten (IM; $n = 85$) sowie die Anzahl an möglichen Kontextfaktoren (KF; 144) aufgelistet.

Tabelle 29: Auflistung der Ergebnisse zu den Vorkommnissen im Fehlerkatalog

Nr.	betroffenes Arbeitssysteme	FP	FA	FF	IM	KF
1	3D-CAD-Modell erstellen	1	1	3	5	4
3	Ausgangsmaterial managen	1	1	1	5	3
4	Materialmischung vorbereiten	1	1	1	3	2
5	Anlage vorbereiten	3	2	5	4	8
6	Baujob vorbereiten	2	2	2	4	3
7	Druckvorgang ausführen	6	5	9	9	16
8	Bauteil nachbereiten	6	3	5	10	12
X	Bauteilprüfung /-Endkontrolle	11	10	36	45	96

Wie bereits durch die Ergebnisse zum Fehlerauftreten in den Arbeitssystemen (Abbildung 52) deutlich wurde, ist der Fehlerkatalog insbesondere im Druckvorgang (7), der Bauteilnachbearbeitung (8) und gegebenenfalls bei einer Bauteil-Endkontrolle (X) relevant, da hier die meisten Fehlfunktionen der Prozessauswirkungen auftreten. Tabelle 29 zeigt beispielsweise, dass im Druckvorgang (7) je nach Fehler der Prozessauswirkung bzw. des Bezugsproblems ($n = 6$) aus insgesamt $n = 5$ unterschiedlichen Arbeitssystemen kommen können und davon $n = 9$ relevante Fehlfunktionen diese Fehler hervorrufen. Zu den insgesamt $n = 12$ relevanten Kontextfaktoren der Ursache sind $n = 10$ unterschiedliche Arten an Informationsmärkten bedeutsam. Innerhalb des Fehlerkataloges sind dabei die Kontextfaktoren mit deren spezifischen Informationsmärkten verbunden und die Ursachen können dadurch gezielt nachverfolgt und der Ursachen-Fehler über die relevant akzeptierte Information herausgefunden werden.

Ausgehend vom Fehlerkatalog ist es möglich die dokumentierten Informationsmärkte zu fokussieren. Eine kategorische Betrachtung¹³ dieser Ergebnisse (Tabelle 30) zeigt, dass aktuell $n = 8$ mögliche Kategorien an Informationsmärkten vorliegen, diese sich in $n = 41$ Arten widerspiegeln und im Zusammenhang mit den gesamten Kontextfaktoren in insgesamt $n = 224$ Fällen genannt wurden. Aus dieser Betrachtung geht hervor, dass häufig auf Wissensobjekte ($n = 62$) zurückgegriffen wird und hierzu $n = 11$ unterschiedliche Arten bestehen. Dabei sind sowohl druckspezifische Wissensobjekte wie das Übergabeprotokoll, das Druckprotokoll, die Mischdaten, Logdaten und die Bauteileigenschaften bzw. Kundenvorgaben, als auch allgemeingültige Designrules, Exceltabellen zur Bestimmung der Parameter und Versuchsdokumentationen zu nennen. Auffällig ist ebenfalls die hohe Anzahl an interner ($n = 49$) und externer ($n = 37$) Kommunikation, bei denen insbesondere Kollegen oder spezifische Experten, Verantwortliche und Ersteller sowie spezifische Hersteller oder Kunden kontaktiert werden. Hervorzuheben ist zudem, dass die Realien in der AMC-Umgebung ($n = 42$) ebenfalls häufig genannt wurden. Hierunter fallen beispielsweise das Manometer, der Kompressor,

¹³ Für die kategorische Betrachtung wurden die Informationsmärkte hinsichtlich deren Art gefiltert und gebündelt. Zudem wurde die Anzahl an deren Nennungen über die gesamten Kontextfaktoren hinweg dokumentiert und zusammengerechnet.

Verpackungen bzw. Behältnisse und Dokumente wie Produktdatenblätter, Lieferscheine etc.. Anleitungen (n = 22) zum Drucker, dem Mischer oder Programme sowie Handbücher und Fachliteratur wurden im Vergleich weniger oft genannt. In deutlich wenigen Fällen würden Regelwerke oder die DIN (n = 5) herangezogen oder eine Recherche allgemein im Internet oder in Foren (n = 5) durchgeführt werden. In drei Fällen müssten neue Prüfungen erfolgen oder Vorgänge wiederholt werden.

Tabelle 30: Kategorische Darstellung der Informationsmärkte mit Anzahl an Arten und Nennungen

Informationsmärkte	Arten	Nennungen
Anleitungen	7	22
Anleitungen: Drucker, Mischer, Waage, CAD-Programm; Softwarehandbuch, spezifische Unterlagen, Fachliteratur		
Realien in AMC-Umgebung	7	42
Produktdatenblatt, Manometer, Lieferschein, Beschriftungen, Verpackungen/Behälter, Bestellschein, Kompressor		
Regelwerk, DIN, Vorgabe	3	5
Regelwerk, DIN, Konventionsvorgabe		
Online	2	5
Internet, Foren		
Wissensobjekte	11	62
Designrules, Übergabeprotokoll, Exceltabellen, Mischzettel, Druckprotokoll, Logdaten, Bauteileigenschaften/Kundenvorgabe, Messversuche/Versuchsdokumentation		
Dritte kontaktieren	4	37
Hersteller: Drucker, Düsen, Material; Kunde		
Interne kontaktieren	5	49
Kollegen/Experte, Haustechniker, Lagerverantwortlicher, Materialmischungsexperte, Übergabeprotokollersteller		
Neuversuche	2	3
Neue Prüfungen, Vorgang wiederholen		

4.2.3 Überprüfung entlang Gütekriterien qualitativer Forschung

Sowohl das Arbeitsmodell als auch das methodische Vorgehen zum Forschungsansatz mit den umgesetzten Ergebnissen müssen den Gütekriterien qualitativer Forschung entsprechen. Daher werden diese über entsprechende Kriterien untersucht (Abschnitt 4.2.3.1) und die zentralen Instrumentarien mit der Inter-Rater-Reliabilität (Abschnitt 4.2.3.2) überprüft.

4.2.3.1 Arbeitsmodell und methodisches Vorgehen

Die Überprüfung des methodischen Vorgehens geht mit der Überprüfung der Arbeitsmodelle einher und wird entlang der allgemeinen Gütekriterien qualitativer Forschung nach Mayring (Mayring, 2016, S. 144 ff.) reflektiert. Diese spiegeln sich in den sechs Kriterien 1) Verfahrensdokumentation, 2) argumentative Interpretationsabsicherung, 3) Regelgeleitetheit, 4) Nähe zum Gegenstand, 5) kommunikative Validierung sowie 6) Triangulation wider.

1) Verfahrensdokumentation

Innerhalb der Verfahrensdokumentation wird vorgegeben, den Forschungsprozess detailliert zu dokumentieren und damit für andere nachvollziehbar zu machen. „Dies betrifft die Explikation des Vorverständnisses, Zusammenstellung des Analyseinstrumentariums, Durchführung und Auswertung der Datenerhebung“ (ebd., S. 145). Dem Forschungsansatz wird hierbei auf drei Wegen begegnet. Zum einen werden die theoretischen Leitlinien in deren Verständnissen umfangreich erläutert und zur Integration dieser in das Arbeitsmodell nachvollziehbare Transformationsschritte ausgewiesen. Zum anderen wird das methodische Vorgehen ebenfalls über die durchzuführenden Schritte expliziert. Zusätzlich wurde zur Umsetzung des methodischen Vorgehens ein Handbuch (siehe Anhang) verfasst, welches die schrittweise Beschreibung aufgreift, diese mit erweiterten Erklärungen vertieft und mit konkreten Leitfragen hinterlegt sowie mit Ankerbeispielen ergänzt.

2) Argumentative Interpretationsabsicherung

Mit der argumentativen Interpretationsabsicherung gilt es, bei Interpretationen auf Schlüssigkeit und Brüche hinzuweisen (ebd., S. 145). Bezüglich der Theorie-Integration zum Arbeitsmodell haben sich mehrere Schlüssigkeiten ergeben, auf welche explizit hingewiesen wird. Etwaige Brüche konnten hierbei nicht festgestellt werden und wurden auch innerhalb der Umsetzung der Pilotierung nicht ersichtlich. Bezüglich des methodischen Vorgehens integrieren die Phasen 0, I und II in sich verifizierende Schleifen der erhobenen und ausgewerteten Daten. Zudem wird das Vorgehen von einem erfahrenen Bauingenieur hinsichtlich fachlicher Korrektheit begleitet sowie als ‚Critical Friend‘ hinterfragt. Die Ergebnisse werden zudem mit den Experten rückbesprochen und dadurch als diskursive Gruppeninterpretationen abgesichert.

3) Regelgeleitetheit

Zur Regelgeleitetheit gilt es, die Qualität durch ein schrittweises, sequenzielles Vorgehen abzusichern. „Die Analyseschritte werden vorher festgelegt, das Material wird in sinnvolle Einheiten unterteilt, und die Analyse geht nun systematisch von einer Einheit zur nächsten“ (ebd., S. 146). Wie bereits in der Verfahrensdokumentation aufgezeigt, werden zum methodischen

Vorgehen umzusetzende Schritte ausgewiesen und diese zusätzlich über das Handbuch (siehe Anhang) angereichert. Diese Schritte sind innerhalb des methodischen Vorgehens in fünf Phasen als ‚sinnvolle Einheiten‘ systematisiert, welche zielorientiert auf die spezifischen Erhebungen bzw. Analysen und Auswertungen ausgerichtet sind und dadurch eine sukzessive Erfassung des Forschungsgegenstands ermöglichen.

4) Nähe zum Gegenstand

Mit der Nähe zum Gegenstand wird an die Alltagswelt der beforschten Subjekte angeknüpft und die involvierten Personen werden in deren natürlicher, empirischer Umgebung begleitet, um bestenfalls eine Interessenübereinstimmung mit den Beforschten zu erreichen (ebd., S. 146). Durch die explorative Ausrichtung der Forschungsarbeit, die Prozessbeobachtung, die Verwendung praxisnaher Ansätze – FMEA, MTO, REFA, Arbeitsablaufpläne – und durch den thematischen Bezug der Experten zu deren Forschungsthemen ist die Nähe zum Gegenstand vollumfänglich gegeben.

5) Kommunikative Validierung

„Die Gültigkeit der Ergebnisse, der Interpretationen kann man auch dadurch überprüfen, indem man sie den Beforschten nochmals vorlegt, mit ihnen diskutiert“ (ebd., S. 147). Die kommunikative Validierung der Datenbasis in den Phasen I und II ist im methodischen Vorgehen zentral verankert, da der Arbeitsablaufplan (Schritt PI-4) und der Arbeitssystembaum (Schritt PI-9) jeweils mit dem Experten rückbesprochen werden und die FMEA-Ergebnisse gemeinsam mit Experten erhoben sowie dokumentiert werden. Hierbei gilt zudem der Grundsatz, dass ausschließlich die Experten die Funktionen und Fehlfunktionen generieren und die Beisitzenden lediglich kommentieren und moderieren. Weitere kommunikative Validierungen mit den AMC-Experten in den Phasen III und IV sind aufgrund der materialanalytischen sowie kompetenzbezogenen Ausrichtung nicht vorgesehen.

6) Triangulation

Bezüglich der Triangulation ist die Verwendung mehrerer Datenerhebungs- oder Analysemethoden zu nennen. „[...] so kann auch bei qualitativer Forschung die Qualität der Forschung durch die Verbindung mehrerer Analysegänge vergrößert werden“ (ebd., S. 147). Im Arbeitsmodell werden Bezüge zu theoretischen Ansätzen aus verschiedenen Wissenschaften hergestellt und dadurch eine vielschichtige Betrachtung des Forschungsgegenstands ermöglicht sowie über das methodische Vorgehen eine breite Datengrundlage geschaffen. Durch die stetige Weiterführung der Ergebnisse, welche in sich greifen müssen, um deren Schlüssigkeit zu wahren, wird im methodischen Vorgehen über mehrere Erhebungs- und Analyse- bzw. Auswertungsverfahren die Triangulation unmittelbar mit einbezogen.

4.2.3.2 Inter-Rater-Reliabilität

Die Überprüfung der Inter-Rater-Reliabilität (kurz: IRR) wurde im Rahmen der Masterarbeit von Borowsky (2024) an den zentralen Instrumentarien 1) des Arbeitsablaufplans, 2) des

Arbeitssystembaums und 3) der Kompetenzmatrix umgesetzt. Hierfür wurde Rater 2 von Rater 1 über ein Briefing entlang des Handbuchs zum Forschungsansatz (siehe Anhang) in die Thematik eingeführt bzw. eingewiesen und der aktuelle Stand zur Forschungsarbeit mit den theoretischen Hintergründen inklusive Arbeitsmodell und methodischem Vorgehen konnte eingesehen werden. Rater 2 erhielt zudem die Videos der Prozessbeobachtung, die entsprechenden, ausgefüllten Instrumente der Pilotierungsergebnisse sowie deren Vorlagen.

1) Arbeitsablaufplan

Zur Überprüfung wurden die Tätigkeiten sowie Arbeits-/Betriebs- und Hilfsmittel von Rater 2 aus den Videos der Prozessbeobachtung in den Arbeitsablaufplan entlang der Schritte im Handbuch (siehe Anhang) expliziert. Der erstellte Arbeitsablaufplan wurde daraufhin mit dem Arbeitsablaufplan der Pilotierung abgeglichen. Die IRR zum gesamten Arbeitsablaufplan ergab eine Übereinstimmung von 81,82 %. Mit der Fokussierung auf die Haupttätigkeiten ergab dieser Abgleich eine Übereinstimmung von 94,05 %. Das bedeutet, dass die entscheidenden Haupttätigkeiten, welche für die Generierung der Sub-Arbeitssysteme verwendet werden, nahezu vollständig identifiziert wurden und die vor- und nachbereitenden Tätigkeiten eine gewisse Varianz aufzeigen. Da die explizierten Arbeits-/Betriebs- und Hilfsmittel innerhalb eines Arbeitssystems bzw. einer beruflichen Handlung in die Kompetenzmatrix eingehen, ist für die IRR diese Betrachtung von Relevanz und der Abgleich der Explikationen auf Arbeitssystemebene (Tabelle 31) wurde durchgeführt. Die IRR ergab insgesamt 94,38 % Übereinstimmung.

Tabelle 31: Ergebnisse zur Inter-Rater-Reliabilität der Arbeits-/Betriebs- und Hilfsmittel

Arbeitssystem	IRR-Ergebnisse
3D-CAD-Datei erstellen	100%
Material- und Prozessparameter festlegen	100%
Ausgangsmaterial managen	keine
Materialmischung vorbereiten	81,25%
Anlage vorbereiten	100%
Baujob vorbereiten	100%
Druckvorgang ausführen	90,90%
Bauteil nachbearbeiten	100%
Bauteil nachbehandeln	100%
Materialüberschuss nachbereiten	92,31%
Anlage nachbereiten	85,71%
Gesamt	94,38%

2) Arbeitssystem

Zum Arbeitssystembaum wurde die Generierung der Sub-Arbeitssysteme und der Arbeitssysteme überprüft. Hierfür wurde der Arbeitsablaufplan der Pilotierungsergebnisse

herangezogen, da dieser mit dem Experten rückbesprochen, die Nomenklatur angepasst und fehlende Tätigkeiten ergänzt wurde. Der Abgleich des erstellten Arbeitssystembaums mit dem Arbeitssystembaum der Pilotierungsergebnisse ergab bezüglich der Sub-Arbeitssysteme eine Übereinstimmung von 96,30 % und auf Arbeitssystemebene 100 %.

3) Konzeptionsmatrix

Im Rahmen der IRR zur Kompetenzmatrix (Tabelle 32) wurde die Generierung und Analyse der Kompetenzen entlang der Schritte im Handbuch (siehe Anhang) überprüft. Lediglich die Benennung der Matrix (Schritt PIII-1), die Vorstrukturierung entlang der DIN (Schritt PIII-2) sowie das Umformulieren der Arbeitssysteme in berufliche Handlungen (Schritt PIII-3) wurden hiervon ausgenommen. Im Zentrum der Überprüfung stand die Explikation der Wissensaspekte entlang der Schritte PIII-4 bis PIII-9 inklusive Revision PIII-10. Das Durchlaufen dieser Schritte ist für alle Arbeitssysteme bzw. beruflichen Handlungen gleich, daher wurde die IRR an den drei bedeutsamen Arbeitssystemen ‚Anlage vorbereiten‘, ‚Baujob vorbereiten‘ und ‚Druckvorgang ausführen‘ durchgeführt. Insgesamt ergab die IRR-Überprüfung eine Übereinstimmung von 95,29 %. Die Varianzen ergeben sich hierbei lediglich in den Sachwissensaspekten.

Tabelle 32: Ergebnisse zur Inter-Rater-Reliabilität der Wissensaspekte der Konzeptionsmatrix

Arbeitssystem	Sachwissen	Prozesswissen	Reflexionswissen	Gesamt
Anlage vorbereiten	92,31%	100%	100%	95,65%
Baujob vorbereiten	96,15%	100%	100%	97,14%
Druckvorgang ausführen	88,23%	100%	100%	92,59%
Gesamt				95,29%

4.3 Umsetzung im empirischen Feld

Die Umsetzung des Forschungsansatzes – Forschungsziel 2 – ist an zwei spezifischen AMC-Verfahren geplant. Ausgangspunkt für den empirischen Zugang ist das DFG-geförderte Projekt TRR 277 der TU Braunschweig und TU München. Segmentiert in drei Focus Areas: A „Materials an Processes“, B „Computational Modeling and Process Control“ und C „Design and Construction“ wird hier die gesamte AMC-Prozesskette beforscht. Für die Forschungsarbeit ist der Schwerpunktbereich A (Abbildung 53) von Bedeutung, da hierin die tatsächlich ablaufenden AMC-Fertigungsprozesse zum Partikelbettverfahren – über die Aktivierung und Intrusion – sowie zum Ablageverfahren – über Extrusion und Shotcrete – entwickelt werden. Die AMC-Druckverfahren sind den Werkstoffbereichen des Massivbaus A01–A04, mit Faserbewehrung A05, des Stahlbaus A06 und A07 sowie des Holzbaus A08 zugeordnet.

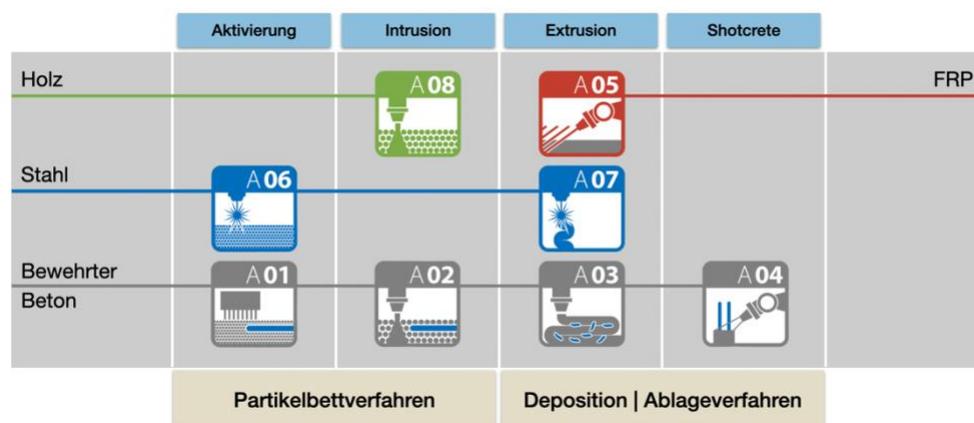


Abbildung 53: TRR277 – Teilprojekte der Focus Area A mit AMC-Verfahren, Methoden und Material

Der forschungsmethodische Ansatz wird innerhalb der Teilprojekte A01 und A07 umgesetzt (Teilziel 2 – Abschnitt 3.1). A01 ist im Bereich des Partikelbett-3D-Drucks verortet und erforscht die selektive Zementaktivierung (SCA). Das Verfahren wird ausgewählt, da dies das Pendant zum Pilotierungsverfahren ist und der Ansatz hierbei zusammen mit anderen externen Experten der TU Braunschweig umgesetzt wird sowie die erzielten Ergebnisse in der Diskussion vor dem Hintergrund einer Intra-Rater-Reliabilität reflektiert werden können. Weiter wird das Teilprojekt A07 aus dem anderen Entwicklungsbereich des Ablageverfahrens ausgewählt. Die AMC-Fertigung ist hier aufgrund bereits bestehender AM-Verfahren zum Werkstoff Stahl deutlich fortgeschrittener als im Massivbau. A07 untersucht konkret die Herstellung von komplexen individualisierten Stahlkomponenten über die additive Draht- und Lichtbogenfertigung (kurz: WAAM; Wire and Arc Additive Manufacturing).

Weitere Verfahrensuntersuchungen im Rahmen der Forschungsarbeit liefern keine tiefgreifenderen wissenschaftlichen Erkenntnisse zum Forschungsansatz. Der TRR277 bietet dennoch die Möglichkeit einer weiteren Umsetzung des Ansatzes und damit verbunden die Generierung von weiteren AMC-Kompetenzprofilen mit Fehlerkatalogen.

4.4 Ergebnisse und Befunde

Ausgehend von der Umsetzung des Forschungsansatzes im empirischen Feldzugang werden die Ergebnisse zu Teilprojekt A01 (Abschnitt 4.4.1) sowie zu Teilprojekt A07 (Abschnitt 4.4.2) dargestellt. Die Gliederung dieser Abschnitte folgt – gleich zu den Pilotierungsergebnissen – den jeweiligen Phasen des methodischen Vorgehens.

4.4.1 Selektive Zementaktivierung (Teilprojekt A01)

4.4.1.1 Phase I: Prozessstrukturierung und -systematisierung

Ausgehend von Phase I zur Prozessstrukturierung und -systematisierung lässt sich der SCA-Fertigungsprozess des Teilprojektes A01 entlang eines Flow-Charts (Abbildung 54) mit den generierten Arbeitssystemen, deren Outputs und ablaufenden Zusammenhängen darstellen.

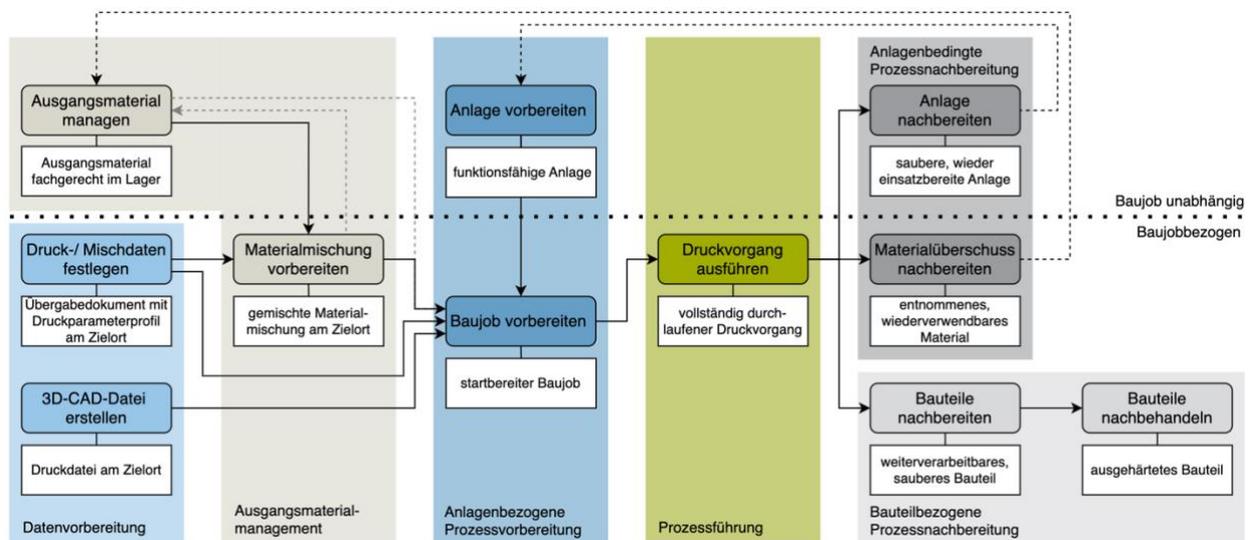


Abbildung 54: Prozesssystematisierung über Arbeitssysteme mit Outputs zum SCA-Fertigungsprozess (A01)

Der Fertigungsprozess beginnt mit der Erstellung der 3D-CAD-Datei, bei der die Volumenkörper nach definierten Kriterien konstruiert und angeordnet werden, so dass die Export-Datei den virtuellen Baujob abbildet. Zur Datenvorbereitung werden zudem entlang einer Excel-Tabelle die (Druck-)Parameter bestimmt und als Druckparameter-Profil notiert. Hinzu kommt, dass die erforderlichen Materialmengen berechnet, die Mischdaten festgelegt und zusammen dokumentiert auf einem Notizzettel weitergegeben werden. Innerhalb des Ausgangsmaterialmanagements wird die Materialbestellung durchgeführt, diese bei der Annahme kontrolliert und im Lager entsprechend fachgerecht eingeräumt. Der Zement wird dabei vor der Lagerung zusammen mit Silika-Pads in Schweißfolie umverpackt. Entlang des Notizzettels mit den angegebenen Materialmischungs- und Mengenangaben sowie den Mischdaten können die Fachkräfte die Materialmischung vorbereiten. Im Rahmen der anlagenbezogenen Prozessvorbereitung wird die Anlage gestartet, der Düsentest durchgeführt und bei Bedarf die Düsen gereinigt. Bezüglich der Vorbereitung des Baujobs werden die CAD-Datei sowie das Druckparameterprofil mit den Slicing-Einstellungen geladen und die Basisschicht erstellt. Mit dem startbereiten Baujob kann der Druckvorgang ausgeführt werden. Die Fachkraft beobachtet diesen

und füllt – je nach Größe des Baujobs – Materialmischung in den Materialbehälter nach. Nachdem der Druckvorgang vollständig durchlaufen ist, können nach einer definierten Wartezeit die Bauteile ausgegraben werden. Dabei wird der Materialüberschuss bereits grob entfernt und in einen gesonderten Behälter abgefüllt, die Bauteile werden entnommen und anschließend in der Auspackstation grob gesäubert bzw. abgebürstet und mit Druckluft gereinigt. Mit dem Aussaugen des Bauraumes und des Materialbehälters wird der Materialüberschuss entfernt und zugleich der Bauraum sowie Teile der Anlage gesäubert. Zudem wird erneut der Düsentest gestartet und die Düsen werden nach einem definierten Vorgehen gereinigt. Abschließend zur anlagenbedingten Prozessnachbereitung wird der Staubsaugerbehälter entleert und das wiederverwendbare Material wird verschlossen, beschriftet und eingelagert. Zur Nachbehandlung der Bauteile werden diese in ein Wasserbad gelegt, nach einer vorgegebenen Wartezeit entnommen und in eine Klimakammer eingelegt. Dort verweilen die Bauteile eine definierte Zeit und werden daraufhin 28 Tage unter Lagerbedingungen nach DIN 1290-2 zum Aushärten gelagert. Für die eben dargestellte Beschreibung zum SCA-Fertigungsprozess und die konkrete Analyse und Auswertung der Prozessbeobachtung wurden im Arbeitsablaufplan (Tabelle 33) insgesamt 220 Tätigkeiten – davon 129 Haupttätigkeiten (HT) und 91 vor- und nachbereitende Tätigkeiten (v-n-T) – expliziert. Zum Arbeitssystembaum wurden insgesamt 32 Sub-Arbeitssysteme (S-AS) und 11 Arbeitssysteme (AS) generiert.

Tabelle 33: Ergebnisse zur Prozessstrukturierung und -systematisierung des SCA-Fertigungsverfahrens (A01)

Relevanter Bereich der DIN SPEC 17071:2019	Tätigkeiten		S-AS	AS
	HT	v-n-T		
Datenvorbereitung	n = 29		n = 5	n = 2
	n = 21	n = 8		
Ausgangsmaterialmanagement	n = 75		n = 8	n = 2
	n = 38	n = 37		
Anlagenbezogene Prozessvorbereitung	n = 40		n = 6	n = 2
	n = 22	n = 18		
Prozessführung	n = 15		n = 2	n = 1
	n = 12	n = 3		
Anlagenbedingte Prozessnachbereitung	n = 33		n = 7	n = 2
	n = 17	n = 16		
Bauteilbezogene Prozessnachbereitung	n = 28		n = 4	n = 2
	n = 19	n = 9		

Die Ergebnisse zeigen eine deutliche Anhäufung von Tätigkeiten im Bereich des Ausgangsmaterialmanagements. Hierzu wurden von der Materialbestellung und -annahme bis hin zur Herstellung der Materialmischung viele kleinschrittige Tätigkeiten expliziert. Dabei ist die Anzahl an Haupttätigkeiten und vor- bzw. nachbereitenden Tätigkeiten in einem ausgewogenen

Verhältnis. Die Anzahl an Sub-Arbeitssystemen ist ebenfalls hierauf zurückzuführen. Die $n = 8$ Teilerzeugnisse fließen im relevanten Bereich der DIN 17071 in $n = 2$ konkrete Outputs (Arbeitssysteme) zusammen. Zur anlagenbezogenen Prozessvorbereitung ($n = 40$) wurde ebenfalls eine hohe Anzahl an Tätigkeiten – ausgewogenes Verhältnis der Tätigkeitsdifferenzierung ($n = 22$; $n = 18$) – expliziert. Entlang dieser Tätigkeiten wurden $n = 6$ Sub-Arbeitssysteme generiert. Im Vergleich dazu wurden im Rahmen der anlagenbedingten Prozessnachbereitung ($n = 33$) weniger Tätigkeiten dokumentiert jedoch hierzu mehr Sub-Arbeitssysteme ($n = 7$) erzeugt. Dies ist auf die Nachbereitung des Materialüberschusses zurückzuführen, da sich hier Überlappungsbereiche zum Abfüllen und Lagern der Materialmischung ergeben und aufgrund der dabei erstellten Teilerzeugnisse erneut generiert worden sind. Insgesamt werden in beiden Bereichen die entstehenden Teilergebnisse erneut auf der Ebene der Arbeitssysteme zu jeweils zwei spezifischen Outputs zusammengeführt. Die Datenvorbereitung ($n = 29$) weist bezüglich des Tätigkeitsumfangs eine Ähnlichkeit mit der bauteilbezogenen Prozessnachbereitung ($n = 28$) auf. Die Haupttätigkeiten führen dabei innerhalb der Datenvorbereitung zu $n = 5$ Sub-Arbeitssystemen bzw. bezüglich der bauteilbezogenen Prozessnachbereitung zu $n = 4$ Teilerzeugnissen. Hervorzuheben ist, dass die Prozessführung mit nur $n = 1$ Arbeitssystem erzeugt werden konnte, da hier die Fachkraft mit der Kontrolle von Prozessparametern eine überwachende Funktion hat und zudem nur bei Bedarf die Materialmischung nachfüllen muss. Dennoch sind hierin die meisten Tätigkeiten als Haupttätigkeiten zu verzeichnen. In Tabelle 34 werden die Tätigkeiten des Arbeitsablaufplans unter verschiedenen Betrachtungsperspektiven dargestellt und entsprechend ihrer Anzahl an Tätigkeiten gebündelt.

Tabelle 34: Betrachtungsperspektiven der Tätigkeiten des Arbeitsablaufs (A01)

Betrachtungsperspektiven (BP)		Tätigkeiten	
		HT	v-n-T
1	Bauteilherstellung (exklusive Materialmischung vorbereiten)	n = 84	
		n = 54	n = 30
2	Bauteilvorbereitung	n = 41	
		n = 23	n = 18
3	Bauteilnachbereitung /-behandlung	n = 28	
		n = 19	n = 9
4	Materialvor-und -nachbereitung (exklusive Ausgangsmaterial managen)	n = 82	
		n = 42	n = 40
5	Anlagenvor- und -nachbereitung	n = 29	
		n = 16	n = 13

Die erste Perspektive (BP1) zeigt, dass $n = 84$ von den insgesamt $n = 222$ Tätigkeiten zur Herstellung des Bauteils – ausgenommen der Vorbereitung der Materialmischung – aufgebracht werden. Im Vergleich zur Bauteilvorbereitung (BP2; $n = 41$) zur Bauteilnachbereitung/-behandlung (BP3; $n = 28$) ist ein Schwerpunkt in der Vorbereitung zu erkennen. Dies begründet

sich durch die überwiegenden vor- und nachbereitenden Tätigkeiten, die der Erstellung der Basisschicht zuzuordnen sind. In Bezug auf die Vorbereitung und Nachbereitung der Materialmischung (BP4; n = 82) werden im Vergleich zum Gesamtprozess auch viele Tätigkeiten aufgewendet. Die Vorbereitung und Nachbereitung der Anlage (BP5) nehmen mit n = 29 Tätigkeiten einen geringen Anteil im Gesamtprozess ein.

4.4.1.2 Phase II: Fehler- und Risikoanalyse

Innerhalb der Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (Tabelle 35) wurden die Funktionen und Fehlfunktionen bei den Bauteileigenschaften mit insgesamt n = 6, zu den Prozessauswirkungen mit n = 34, auf Arbeitssystemebene mit n = 88 sowie auf Ursachenebene mit n = 302 erschlossen.

Tabelle 35: Gesamtübersicht der Funktionen und Fehlfunktionen des SCA-Fertigungsprozesses (A01)

Art	Bauteileigenschaften	Prozessauswirkung	Fehlerart (Arbeitssystem)	Fehlerursachen (5M-Prozesseinflüsse)
Funktionen	n = 2	n = 5	n = 36	n = 144
Fehlfunktionen	n = 4	n = 29	n = 52	n = 158 (47)

Mit der Fokussierung der Fehlerursachen (n = 111 – n = 47 mit ‚Keine‘ ausgenommen) zeigt die Verteilung der Fehlfunktionen im Gesamtprozess (Abbildung 55), dass der Mensch mit n = 48 Fehlfunktionen den größten Anteil der möglichen Fehler verursachen kann, die Maschinenfehlfunktionen mit n = 29 ebenfalls einen bedeutenden Anteil einnehmen und die Methode (n = 18) und die Mitwelt (n = 11) einen abnehmenden, geringeren Anteil bzw. die Fehlfunktionen des Materials mit n = 5 den geringsten Anteil bilden.

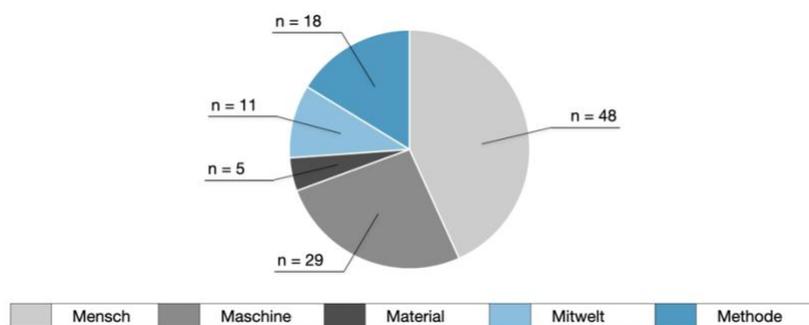
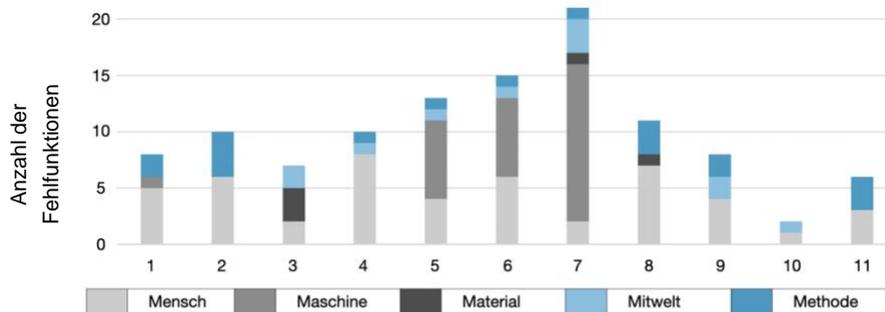


Abbildung 55: Verteilung der Ursachen-Fehlfunktionen der 5M-Prozesseinflüsse im Gesamtprozess (A01)

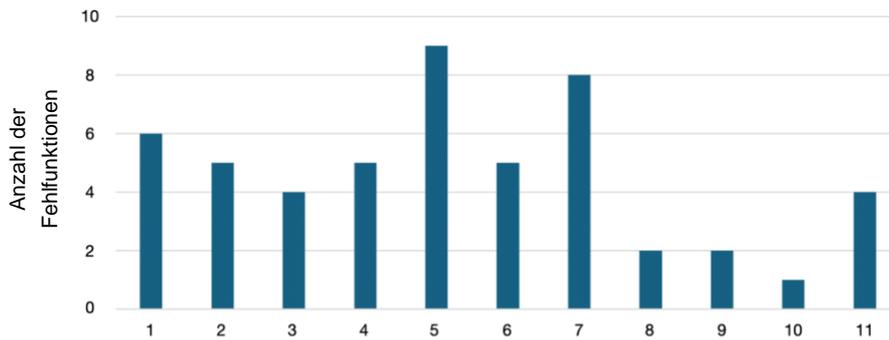
In Abbildung 56 werden die Fehlfunktionen der 5M-Prozesseinflüsse auf die Arbeitssysteme abgebildet.



1	3D-CAD-Datei erstellen	4	Materialmischung vorbereiten	7	Druckvorgang ausführen	10	Materialüberschuss nachbereiten
2	Druck-/ Mischdaten festlegen	5	Anlage vorbereiten	8	Bauteil nachbereiten	11	Anlage nachbereiten
3	Ausgangsmaterial managen	6	Baujob vorbereiten	9	Bauteil nachbehandeln		

Abbildung 56: Verteilung der Fehlerursachen in den Arbeitssystemen (A01)

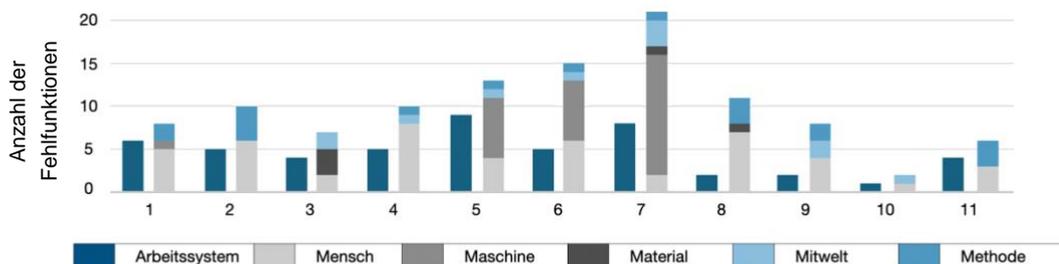
Hierbei zeigt sich, dass sich die menschlichen Fehlfunktionen im Fertigungsprozess verteilen und sich insbesondere in der Datenvorbereitung (1 und 2), der Vorbereitung der Materialmischung (4) und des Baujobs (6) sowie der Bauteilnachbereitung (8) bemerkbar machen. Deutlich zentrierter stellen sich die Maschinenfehlfunktionen innerhalb der Vorbereitung der Anlage (5) und des Baujobs (6) dar, welche schließlich im Druckvorgang (7) zusammenwirken. Die Fehlfunktionen des Materials sind schwerpunktmäßig im Managen des Ausgangsmaterials (3) sowie anteilig im Druckvorgang (7) und der Bauteilnachbereitung (8) verortet. Mit dem Fokus auf die Mitwelt und damit den Umgebungs- und Versorgungseinflüssen lässt sich feststellen, dass sich diese über die Arbeitssysteme 3–10 verteilen und sich diese besonders im Druckvorgang (7), beim ‚Ausgangsmaterial managen‘ (3) und bei der Bauteilnachbehandlung (9) anhäufen. Bezüglich der Methode sind hier die Festlegung der Druck-/Mischdaten (2) mit den selbst erstellten Tabellen und der Übermittlung der Daten, die Nachbereitung des Bauteils (8) und der Anlage (11) hervorzuheben. Dabei kann die Methode zur Nachbereitung der Anlage (11) unmittelbar auf den Schwerpunkt der funktionsfähigen Maschine in den Arbeitssystemen 5–7 zurückgeführt werden. Hinsichtlich der Verteilung der Fehlfunktionsanzahl über die Arbeitssysteme hinweg ist eine Zunahme von der Materialmischung- (4), Anlagen- (5) und Baujobvorbereitung (6) hin zur Ausführung des Druckvorgangs (7) erkennbar. Hier wird die zuvor erwähnte Zentrierung der Maschinenfehlfunktionen ersichtlich. Zudem ist eine Gewichtung in der Vorbereitung (1–6) gegenüber der Nachbereitung (8 bis 11) festzustellen, worin die Summe der bauteilbezogenen Nachbereitungen (8, 9) höher ist als die der anlagenbedingten Nachbereitungen (10, 11). Diese Gewichtung ist ebenfalls in den Fehlfunktionen der Arbeitssysteme (n = 52) und deren Verteilung über den Gesamtprozess (Abbildung 57) erkennbar.



1	3D-CAD-Datei erstellen	4	Materialmischung vorbereiten	7	Druckvorgang ausführen	10	Materialüberschuss nachbereiten
2	Druck-/ Mischdaten festlegen	5	Anlage vorbereiten	8	Bauteil nachbereiten	11	Anlage nachbereiten
3	Ausgangsmaterial managen	6	Baujob vorbereiten	9	Bauteil nachbehandeln		

Abbildung 57: Verteilung der Fehlfunktionen der Arbeitssystemebenen im Gesamtprozess (A01)

Die Ergebnisse zeigen, dass die meisten Fehlfunktionen der Anlagenvorbereitung (5; $n = 9$) zuzuordnen sind und hierzu im Vergleich zur Anlagennachbereitung (11; $n = 4$) ein Schwerpunkt in der Vorbereitung liegt. Die Nachbereitung der Anlage (11) ist im Vergleich zur gesamten Prozessnachbereitung (8 bis 11) jedoch hervorzuheben. Dies begründet sich durch die Anforderungen an die Sauberkeit der Anlage sowie an der Düsenfunktionsfähigkeit. Die Ergebnisse zur Bauteilnachbereitung (8) und -nachbehandlung (9) sind mit dem unbeschädigten und vollständig ausgehärteten Bauteil mit wenigen Anforderungen hinterlegt. Eine weitere Akzentuierung setzen die Anforderungen an den Druckvorgang (7) mit $n = 8$ Fehlfunktionen. Hervorzuheben ist zudem, dass das Erstellen der 3D-CAD-Datei (1; $n = 6$) in deren Anzahl über dem Durchschnitt liegt. Bezüglich der Festlegung der Druck-/Mischdaten (2), der Vorbereitung der Anlage (4) und des Baujobs (6) wurden jeweils gleich viele Fehlfunktionen ($n = 5$) erschlossen. Für den SCA-Fertigungsprozess bedeutet dies, dass an die jeweiligen Outputs der Arbeitssysteme 1–7 – und dabei insbesondere an die erstellte 3D-CAD-Datei, die funktionsfähige, einsatzbereite Anlage und den vollständig durchlaufenen Druckvorgang – hohe Anforderungen bestehen. Zu betonen ist zudem, dass im Vergleich zur bauteilbezogenen Nachbereitung (8, 9) sogar beim Managen des Ausgangsmaterials (3; $n = 4$) eine höhere Anzahl an Fehlfunktionen dokumentiert wurde – was im Kontrast zu den Ursachen-Fehlfunktionen steht. Dies wird deutlich, wenn die Ursachen- und Arbeitssystem-Fehlfunktionen der Arbeitssysteme (Abbildung 58) gegenübergestellt werden.



1	3D-CAD-Datei erstellen	4	Materialmischung vorbereiten	7	Druckvorgang ausführen	10	Materialüberschuss nachbereiten
2	Druck-/ Mischdaten festlegen	5	Anlage vorbereiten	8	Bauteil nachbereiten	11	Anlage nachbereiten
3	Ausgangsmaterial managen	6	Baujob vorbereiten	9	Bauteil nachbehandeln		

Abbildung 58: Gegenüberstellung der Ursachen- und Arbeitssystem-Fehlfunktionen in den Arbeitssystemen (A01)

Dieser Kontrast wird dabei nicht nur in der Nachbearbeitung des Bauteils (8), sondern auch in der Vorbereitung des Baujobs (6), dem Druckvorgang (7) und der Nachbehandlung des Bauteils (9) deutlich. Die Zusammenhänge und der Einfluss vieler Ursachen auf eine geringe Anzahl an Arbeitssystem-Fehlfunktionen werden unmittelbar über die Fehlernetze (Abbildung 59, Abbildung 60) bestätigt. Zudem wird die Verteilung der 5M-Prozesseinflüsse deutlich.

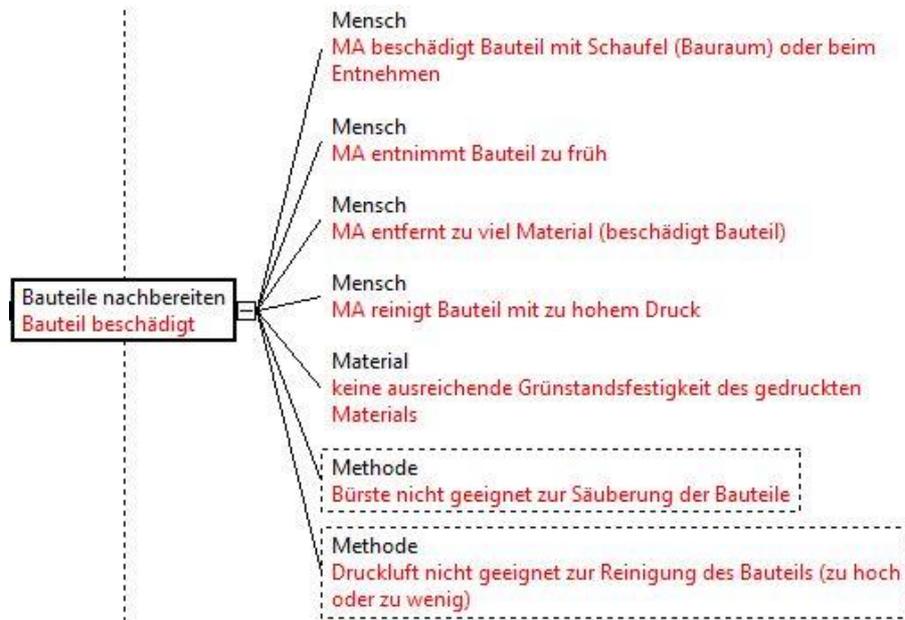


Abbildung 59: Auszug aus dem Fehlernetz zum Arbeitssystem: Bauteil nachbereiten



Abbildung 60: Auszug aus dem Fehlernetz zum Arbeitssystem: Bauteil nachbehandeln

Die Fehlerarten wurden entsprechend mit Fehlfunktionen der Prozessauswirkung verbunden und entlang der vorgegebenen Funktionskategorien (Tabelle 36) dokumentiert. Die $n = 52$

Arbeitssystem-Fehlfunktionen münden in $n = 29$ Prozessauswirkungen. Das bedeutet, dass hier ebenfalls mehrere Fehlerarten gleiche Fehlerfolgen herbeiführen.

Tabelle 36: Verteilung der Fehlfunktionen zur Prozessauswirkung (A01)

Prozessabbruch	Prozesspause	Prozessdurchlauf	Auswirkung auf Folgedruck	Außerhalb der Betrachtung
n = 4	n = 4	n = 15	n = 2	n = 4

Wie aus Tabelle 36 zu entnehmen ist, wurden innerhalb der Prozessauswirkungen jeweils $n = 4$ mögliche Fehler dem Prozessabbruch sowie der Prozesspause zugeordnet. Die Bauteilbeschädigung aus Abbildung 59 ist dabei ein Beispiel für einen möglichen Prozessabbruch. Aus den Ergebnissen zu den Fehlernetzen lässt sich zudem die mögliche Prozesspause (Abbildung 61) verdeutlichen. Darin wird gezeigt, dass der Prozess mit dem Ersetzen oder dem Freibohren der Düsen angehalten werden muss und erst danach wieder weitergeführt werden kann. Zudem verdeutlicht Abbildung 61 die Ursachenschwerpunkte der Maschine in der Anlagenvorbereitung und der Methoden in der Anlagennachbereitung.

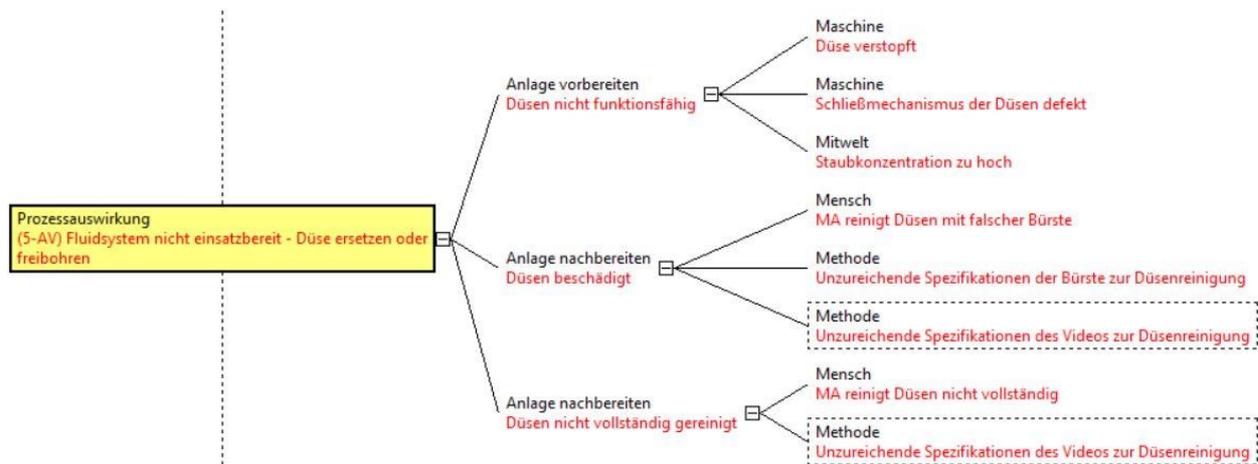


Abbildung 61: Auszug aus dem Fehlernetz mit Fokussierung auf die Prozessauswirkung (Beispiel: Prozessstopp)

Die höchste Anzahl an Fehlfunktionen ist im Prozessdurchlauf ($n = 15$) verortet. Abbildung 62 zeigt hierzu exemplarisch die Diversität an Einflüssen unterschiedlicher Arbeitssystem-Fehlfunktionen in Verbindung mit einer Prozessauswirkung, die durch die Verschmelzung der Bauteile zu einer unbrauchbaren Geometrie führen. Die Ursachen sind dabei u. a. auf den Menschen und invaliden Werten von Tabellen und Maschinenkomponenten zurückzuführen.

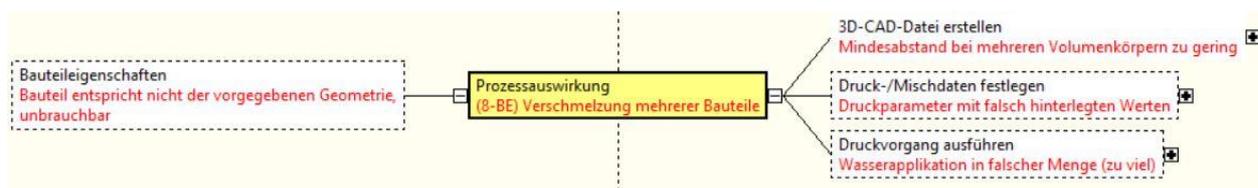


Abbildung 62: Auszug aus dem Fehlernetz mit Fokussierung auf die Prozessauswirkung (Beispiel: Prozessdurchlauf)

Zwei der möglichen Fehler (Tabelle 36) haben eine Auswirkung auf den Folgedruck. Hier sind beispielsweise eine Verunreinigung der Materialmischung oder die Beeinträchtigung der Düsenfunktion durch die Verwendung von ungeeignetem Wasser, welche erst in mehreren nachfolgenden Drucken eine Auswirkung hat, dokumentiert. Insgesamt $n = 4$ weitere liegen außerhalb des Betrachtungsrahmens, da die Auswirkungen noch nicht erprobt sind, die Ökobilanz betreffen oder sich das Lager mit nicht benötigten Materialien füllt.

Ausgehend von den Fehlfunktionsnetzten wurden in den Formblättern zur FMEA insgesamt $n = 254$ Vermeidungs- und Entdeckungsmaßnahmen dokumentiert und entlang des Risikobewertungskatalogs bewertet. Die Maßnahmenergebnisse (Tabelle 37) werden – gleich zu den Pilotierungsergebnissen – kategorisiert¹⁴ und entsprechenden deren Anzahl an Vorkommnissen zusammengefasst.

Tabelle 37: Kategorisierung der Ergebnisse zu Vermeidungs- und Entdeckungsmaßnahmen

Vermeidungsmaßnahmen		Entdeckungsmaßnahmen	
Schulungen des Personals	$n = 35$	Offensichtliche Erkennung	$n = 43$
Spezielle Prozessmaßnahmen	$n = 23$	Prüfung, Kontrolle	$n = 37$
Etabliertes Verfahren, Methode	$n = 16$	Feedback im Prozess	$n = 3$
Keine	$n = 3$	Keine	$n = 14$
Regelmäßige Säuberung, Prüfung und/oder Wartung	$n = 6$		
Dokumentationen und Arbeitsplatzeinrichtung	$n = 20$		
Wartung, Absprache mit Dritten	$n = 5$		

Zu den Vermeidungsmaßnahmen zeigt sich, dass die häufigste Maßnahme über die Schulung des Personals ($n = 35$) erfolgt. Hierzu zählen spezifische und allgemeine Schulungen, Einweisungen sowie das Ausführen der Arbeit durch geschultes Personal. Die Verwendung spezieller Programme und hochwertiger Komponenten oder auch die Schaffung von geeigneten Räumlichkeiten und Bedingungen stellt eine weitere Möglichkeit zur Vermeidung von Fehlern dar (spezielle Prozessmaßnahmen; $n = 23$). $N = 16$ Maßnahmen beziehen sich auf etablierte Verfahren oder Methoden und in $n = 3$ Fällen liegt keine Vermeidungsmaßnahme vor. Vorbeugend werden regelmäßige Säuberungen, Prüfungen und/oder Wartungen ($n = 6$) durchgeführt. Häufig sollen auch entsprechende Dokumentationen und die Einrichtung des Arbeitsplatzes ($n = 20$) Fehler vermeiden. Hinzu kommt, dass eine Wartung oder Absprache mit

¹⁴ Ausgenommen der Überschneidungen von Fehlfunktionen zur Maschine, Mitwelt und Methode und unter Berücksichtigung der Mehrfachnennungen von Maßnahmen fließen in die Kategorisierung $n = 108$ Vermeidungs- und $n = 97$ Entdeckungsmaßnahmen ein. Die Begründung ist in Abschnitt 4.2.2.2 in Fußnote 10 nachzulesen.

Dritten (n = 5) erfolgt. Bei den Entdeckungsmaßnahmen sind die offensichtliche Erkennung des Fehlers (n = 43) sowie die Entdeckung bei Prüfung und Kontrolle (n = 37) dominierend. Zudem werden Fehler über das Feedback im Prozess (n = 3) entdeckt. In n = 14 konkreten Fällen liegt keine Entdeckungsmaßnahme vor, welche entsprechend mit der Höchstzahl bewertet wurde.

Diese Fehlerzusammenhänge und deren Bewertungen wurden in den Formblättern zu den Arbeitssystemen hinsichtlich der Aufgabenpriorität insgesamt n = 17 mit Hoch, n = 37 mit Mittel und n = 73 mit Niedrig eingestuft. Ausgehend von dieser Aufgabenpriorität (Abbildung 63) können die Experten den Prozess entsprechend verbessern.

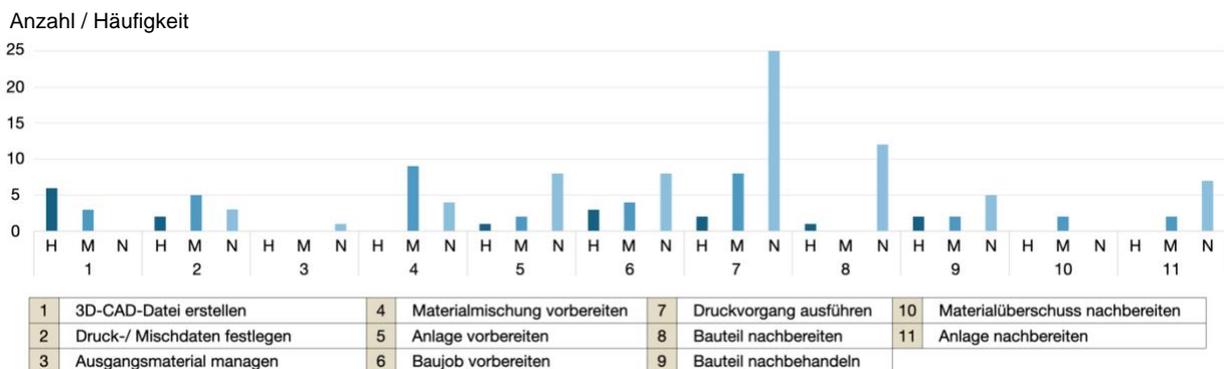


Abbildung 63: Risikobewertung über die Aufgabenpriorität entlang der Arbeitssysteme (A01)

Die Summenanzahlen und die Ergebnisse in Abbildung 63 zeigen, dass die Prioritäten im Prozess häufig ‚niedrig‘ und mäßig ‚Mittel‘ sind. Bei der Erstellung der 3D-CAD-Datei (1) und der Vorbereitung des Baujobs besteht dabei erhöhter Optimierungsbedarf für die Experten.

4.4.1.3 Phase III: Kompetenzanalyse/-generierung

Zum Ergebnis der Kompetenzmatrix wurden die Arbeitssysteme entsprechend deren Anzahl in n = 11 berufliche Handlungen überführt und hierzu insgesamt n = 308 Wissensaspekte identifiziert. Das korrespondierende Wissen (Abbildung 64) gliedert sich dabei in n = 231 Sachwissens- (SW), n = 30 Prozesswissens- (PW) und n = 45 Reflexionswissensaspekte (RW) erster Ebene. Die Anzahl an Wissensaspekten hinsichtlich Prozesswissen und Reflexionswissen zeigt, dass die Verständnisszusammenhänge in SCA-Fertigungsprozess von großer Bedeutung sind.

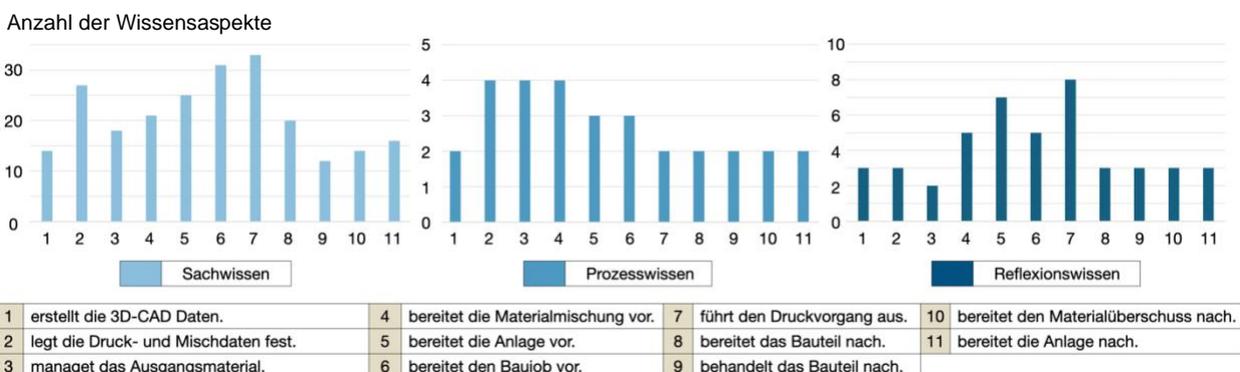


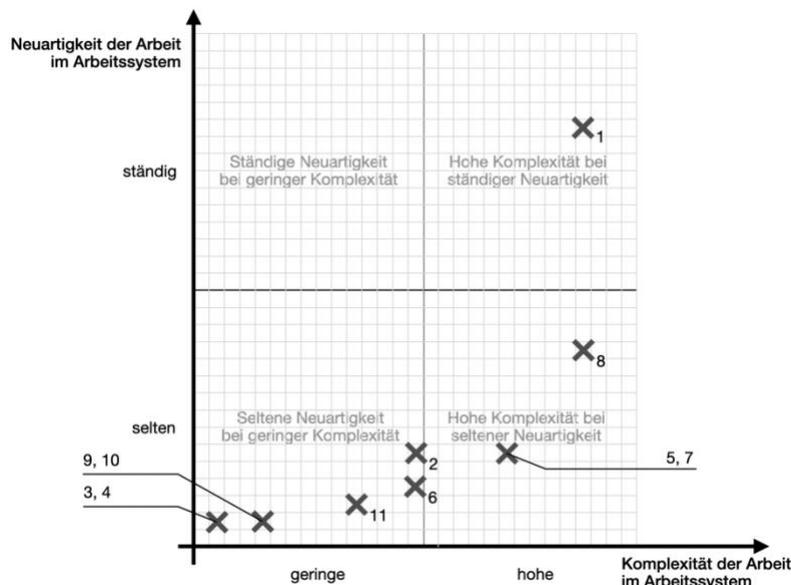
Abbildung 64: Verteilung der Wissensaspekte innerhalb der beruflichen Handlungen (A01)

Die Ergebnisse bezüglich der Anzahl an Wissensaspekten zum Sachwissen sind – wie bereits in den Pilotierungsergebnissen beschrieben – bedingt zu betrachten, da diese durch die Gruppierungen und Auflistungen an Anlagenelementen geringfügig variieren können. Dennoch wurden aufgrund der Material-, Misch- und Prozessparameter im Festlegen der Druck- und Mischdaten (SW-2) eine Vielzahl an Wissensaspekten identifiziert. Ähnliches ist mit den Beobachtungskriterien im Ausführen des Druckvorgangs (SW-7) festzustellen. Innerhalb der Vorbereitung der Anlage (SW-5) und des Baujobs (SW-6) sind überwiegend Anlagenelemente und Hilfsmittel aufgelistet. Die Anzahl an Wissensaspekten zum Prozesswissen zeigt hingegen wenig Variabilität in deren Verteilung auf und setzt auch in Verbindung mit dem Sachwissen erneut einen Schwerpunkt in der Vorbereitung. Auffällig ist dabei, dass die Festlegung der Druck und Mischdaten (PW-2), das Managen des Ausgangsmaterials (PW-3) und die Vorbereitung der Materialmischung (PW-4) mit den meisten beruflichen Handlungssequenzen verbunden sind und sich PW-7 bis PW-11 linear verhalten. Im Gegensatz zum Prozesswissen heben sich die Vorbereitung der Anlage (RW-6) und die Ausführung des Druckvorgangs (RW-7) deutlich ab und weisen die meisten Verständniszusammenhänge auf. Dies ist unmittelbar auf die Funktionsweise der Anlage und die vielschichtigen Zusammenhänge der Beobachtungskriterien zurückzuführen. Mit den herstellbaren Geometrien und Bauteileigenschaften sind in der Datenvorbereitung (RW-1, RW-2) die Verständnisse aufgewogen, die Wissensaspekte zum Prozesswissen jedoch deutlich divergent, da in PW-2 die Bestimmung der Materialmengen und Mischdaten hinzukommen. In Anbetracht der Akzentuierung an Fehlfunktionen in der Nachbereitung der Anlage (siehe Abbildung 57; 11) sind hier die beruflichen Handlungssequenzen (PW-11) und Verständnisse (RW-11) unauffällig. Dies betrifft ebenso die Bauteilnachbereitung (PW-8, RW-8) und -nachbehandlung (PW-9, RW-9). Das Managen des Ausgangsmaterials zeigt deutlich, dass auch viele Prozesswissensaspekte (PW-3) mit wenig Reflexionswissensaspekten (RW-3) einhergehen können, und verdeutlicht, dass hierbei mehrere Handlungssequenzen mit wenig Verständnis hinterlegt sind.

4.4.1.4 Phase IV: Wissensarbeit und Informationsverarbeitung

Mit Phase IV wurden 1) der Grad an potenziell enthaltener Wissensarbeit in den Arbeitssystemen erhoben, 2) das auftretende Arbeitssystem der Fehler der Prozessauswirkungen in den Fehlfunktionen dokumentiert sowie 3) die Informationsmärkte der Ursachen-Fehlfunktionen erschlossen und in einem Fehlerkatalog zusammengeführt.

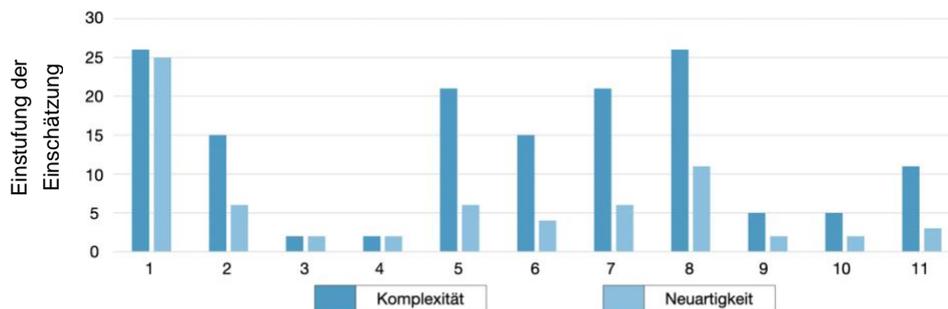
1) Den Einschätzungen des Experten (Abbildung 65) nach fallen die meisten Arbeitssysteme – Druck-/Mischdaten festlegen (2) Ausgangsmaterial managen (3), Materialmischung vorbereiten



(4), Baujob vorbereiten (6), Bauteil nach-behandeln (9) sowie Materialüberschuss nachbereiten (10) und Anlage nachbereiten (11) – in den Bereich ‚Wissensarbeit in Einzelfällen‘; Anlage vorbereiten (5), Druckvorgang ausführen (7) und Bauteil nachbereiten (8) in den Bereich ‚Hohe Komplexität bei seltener Neuartigkeit‘ und nur die 3D-CAD-Datei erstellen (1) in den ‚Originären Bereich von Wissensarbeit‘. Keine Arbeitssystem wurden in ‚Ständige Neuartigkeit bei geringer Komplexität‘ zugeordnet.

Abbildung 65: Einschätzung des Experten zum Grad an potenziell enthaltener Wissensarbeit in den Arbeitssystemen (A01)

Die numerische Überführung und grafische Aufbereitung hinsichtlich Komplexität und Neuartigkeit der Arbeit je Arbeitssystem (Abbildung 66) zeigt, dass die Komplexität in der Erstellung der 3D-CAD-Datei (1), der Vorbereitung der Anlage (5) und Baujobs (6) sowie im Druckvorgang (7) deutlich überwiegt.



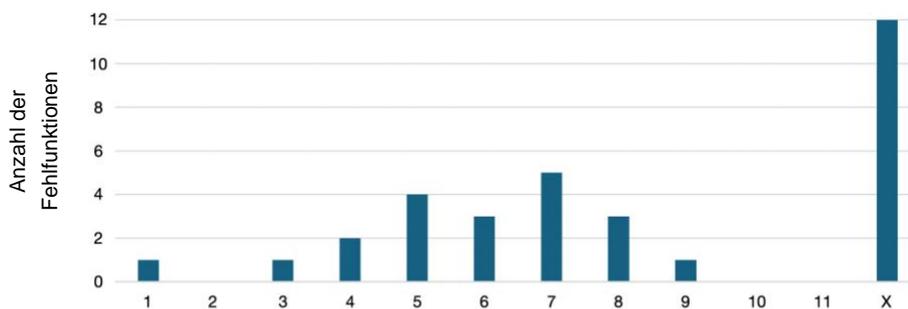
1	3D-CAD-Datei erstellen	4	Materialmischung vorbereiten	7	Druckvorgang ausführen	10	Materialüberschuss nachbereiten
2	Druck-/ Mischdaten festlegen	5	Anlage vorbereiten	8	Bauteil nachbereiten	11	Anlage nachbereiten
3	Ausgangsmaterial managen	6	Baujob vorbereiten	9	Bauteil nachbehandeln		

Abbildung 66: Ergebnis zu Einschätzung der Komplexität und Neuartigkeit der Arbeit in den Arbeitssystemen (A01)

Die Komplexität der herstellbaren 3D-CAD-Geometrien (1) steht dabei in Verbindung mit deren Individualität bzw. damit ebenfalls verbunden, der ständigen Neuartigkeit. Die Festlegung der Druck-/Mischdaten hingegen ist durch die aktuelle Verwendung von Standardmischungen und Druckparametern bedingt komplex und wenig neuartig. Hinsichtlich der Wahrnehmung zur Komplexität der Vorbereitung der Anlage (5) und des Baujobs (6) sowie des Druckvorgangs zeichnet sich ein ähnlicher Verlauf wie bei den Arbeitssystem-Fehlfunktionen ab. Auffällig ist, dass die Nachbereitung des Bauteils als deutlich komplex und selten neuartig eingeschätzt

wurde. Der Experte begründet dies damit, dass das Nachbereiten des Bauteils im Prinzip immer ähnlich ist und es hierfür eine begrenzte Anzahl an Methoden bzw. Vorgehensweisen gibt, jedoch die Geometrien (Lokalität im Bauraum, Größe, Konstruktion) die Arbeit komplex machen können. Ähnliches – dagegen deutlich geringer ausgeprägt – ist in der Nachbereitung der Anlage vorzufinden. In den anderen Arbeitssystemen (5, 6, 7) zeigt sich die Neuartigkeit deutlich geringer ausgeprägt. Dies steht im Zusammenhang mit routinierten Vorgehensweisen sowie mit der mittleren bis niedrigen Auftretenswahrscheinlichkeit möglicher Fehler. Die Arbeitssysteme des Ausgangsmaterialmanagements (3, 4), der Nachbehandlung des Bauteils (9) und der Nachbereitung des Materialüberschusses (10) zeigen sich aufgrund ihrer operativen Ausrichtung wenig komplex und selten neuartig.

2) Bezüglich des Auftretens der Fehlfunktionen der Prozessauswirkung (Abbildung 67) zeigt sich, dass diese vor allem erst in einer Bauteil-Endkontrolle (X, n = 12) auftreten. Aus den Ergebnissen wird zudem ersichtlich, dass die Arbeitssysteme 1, 3, 4 sowie 9 weniger betroffen sind, die Fachkraft jedoch bei der Vorbereitung der Anlage (5) und des Baujobs (6), der Nachbereitung des Bauteils (8) sowie insbesondere im Druckvorgang (7) mit mehreren möglichen Fehlern konfrontiert werden kann.



1	3D-CAD-Datei erstellen	4	Materialmischung vorbereiten	7	Druckvorgang ausführen	10	Materialüberschuss nachbereiten
2	Druck-/ Mischdaten festlegen	5	Anlage vorbereiten	8	Bauteil nachbereiten	11	Anlage nachbereiten
3	Ausgangsmaterial managen	6	Baujob vorbereiten	9	Bauteil nachbehandeln	X	Bauteil-Endkontrolle

Abbildung 67: Ergebnisse zum Fehlerauftreten in den Arbeitssystemen (A01)

3) Das Ergebnis zum Fehlerkatalog (Tabelle 38) wurde zu den oben genannten n = 9 Arbeitssystemen (inklusive Bauteil-Endkontrolle) erstellt. Hierzu wurden jeweils die möglichen Fehlfunktionen der Prozessauswirkung (FP; n = 32), die unterschiedlichen Arten an Fehler-Arbeitssystemen (FA; n = 29), die relevanten Fehlfunktionen (FF; n = 61), die unterschiedlichen Arten an Informationsmärkten (IM; n = 88) sowie die Anzahl an möglichen Kontextfaktoren (KF; 178) aufgelistet. Der Fehlerkatalog ist, wie aus Abbildung 67 hervorgeht, insbesondere für die Vorbereitung der Anlage (5) und des Baujobs (6) sowie für den Druckvorgang (7) relevant. Zudem kann dieser für die Nachbereitung des Bauteils (8) und bei einer möglichen Bauteilendkontrolle (X) herangezogen werden.

Tabelle 38: Auflistung der Ergebnisse zu den Vorkommnissen im Fehlerkatalog (A01)

Nr.	betroffenes Arbeitssysteme	FP	FA	FF	IM	KF
1	3D-CAD-Modell erstellen	1	1	1	4	2
3	Ausgangsmaterial managen	1	2	2	8	2
4	Materialmischung vorbereiten	2	1	3	9	6
5	Anlage vorbereiten	4	2	6	9	13
6	Baujob vorbereiten	3	3	5	9	15
7	Druckvorgang ausführen	5	4	10	11	33
8	Bauteil nachbereiten	3	5	5	9	17
9	Bauteil nachbehandeln	1	1	1	2	2
X	Bauteilprüfung /-Endkontrolle	12	10	28	27	88

Aus Tabelle 38 wird beispielsweise ersichtlich, dass in der Vorbereitung des Baujobs (6) $n = 3$ charakteristische Fehler auftreten können, die aus potenziell $n = 3$ unterschiedlichen Arbeitssystemen durch $n = 5$ unterschiedliche Fehlerarten entstehen. Zu den insgesamt $n = 15$ relevanten Kontextfaktoren der Ursache sind $n = 9$ unterschiedliche Arten an Informationsmärkten bedeutsam. Auffällig ist, dass auch bei einer geringen Anzahl an Prozessfehlern, Fehler-Arbeitssystemen und entsprechenden Fehlfunktionen, wie in den Arbeitssystemen 1, 3 und 4, trotz weniger Kontextfaktoren mehrere Informationsmärkte zur Verfügung stehen. Im Gegensatz dazu sind in den anderen Arbeitssystemen 5, 6, 7, 8 und der Bauteil-Endkontrolle (X) vergleichsweise viele Kontextfaktoren zu Informationsmärkten vorhanden.

Mit der Fokussierung der Informationsmärkte und der – wie bereits in den Pilotierungsergebnissen begründeten – kategorischen Betrachtung der Ergebnisse (Tabelle 39) liegen aktuell $n = 8$ mögliche Kategorien vor. Zum vorliegenden SCA-Fertigungsprozess spiegeln sich diese in $n = 38$ Arten wider und wurden im Zusammenhang mit den gesamten Kontextfaktoren in insgesamt $n = 305$ Fällen genannt. Aus Tabelle 39 geht hervor, dass die interne Kommunikation am häufigsten aufgesucht wird. Dabei wird bei Kollegen bzw. Experten oder Baustoffprüfern nachgefragt oder entsprechende Dokumentenersteller werden kontaktiert. Zudem werden häufig ($n = 71$) Dritte kontaktiert – also der Rat eines Mechatroniker-Experten, eines Komponenten-, Material- oder Drucker-Herstellers wird hinzugezogen. Wissensobjekte, wie sowohl baujobspezifische Notizzettel, Druckparameterprofile, Bauteilanforderungen oder Daten der Sensorik als auch allgemeingültige Exceltabellen zur Materialmischung oder Druckparameter oder Messwerte, werden insgesamt $n = 47$ -mal erwähnt. Tabelle 39 zeigt zudem, dass aktuell $n = 7$ Arten an Anleitungen vorliegen. Dies betrifft Anleitungen zu den Düsen (mit Video), eine Anleitung zum Mischvorgang sowie zur CAD-Software. Zusätzlich zur Herstelleranleitung des Druckers ist noch ein Handbuch vorhanden, welches in Absprache mit dem Hersteller entstanden ist. In dieser möglichen Kategorie sind zudem die Informationsobjekte der Fachliteratur und Paper bzw. Publikationen enthalten. Diese wurden $n = 39$ -mal als mögliche Informationsmärkte

genannt. Zusätzlich kann auf $n = 8$ unterschiedliche Realien in unmittelbarer AMC-Umgebung, wie zum Beispiel Informationen am Drucker selbst, im Lager, den Materialien mit deren Verpackung bzw. Behältnis und Beschriftung, zurückgegriffen werden. Zudem zählen auch Wartungspläne, Lieferscheine oder Produktdatenblätter. Selten ($n = 5$) wird in einem technischen Merkblatt, der DIN oder Mischvorgaben sowie allgemein im Internet, in Foren oder in YouTube recherchiert. In $n = 12$ Fällen müssten neue Berechnungen oder Versuche durchgeführt werden.

Tabelle 39: Kategorische Darstellung der Informationsmärkte mit Anzahl an Arten und Nennungen (A01)

Informationsmärkte	Arten	Nennungen
Anleitungen und Veröffentlichungen	7	39
Anleitungen: Düsen (Video), Mischvorgang, CAD-Software, Drucker (Hersteller); Handbuch Drucker, Fachliteratur, Paper/Publicationen		
Realien in AMC-Umgebung	8	21
Wartungsplan, Produktdatenblatt, Lager, Drucker, Lieferscheine, Bestellschein, Materialien, Verpackung/Behälter		
Regelwerk, DIN, Vorgabe	3	5
Technisches Merkblatt/Sicherheitsdatenblatt, DIN, Mischvorgabe		
Online	3	5
Internet, Foren, YouTube		
Wissensobjekte	7	47
Notizzettel, Messwerte, Excel-Tabellen, Druckparameterprofil, Bauteilanforderungen, Sensorik		
Dritte kontaktieren	4	71
Mechatronik-Experte, Komponenten-Hersteller, Material-Hersteller, Druckerhersteller		
Interne kontaktieren	6	117
Kollegen/ Experte, Dokumentersteller: Video, Übermittlung, CAD-Datei-Ersteller; Baustoffprüfer		
Neuversuche	2	12
Berechnungen, Versuche		

4.4.2 Wire Arc Additive Manufacturing – WAAM (Teilprojekt A07)

4.4.2.1 Phase I: Prozessstrukturierung und -systematisierung

Der WAAM-Fertigungsprozess stellt sich ausgehend von Phase I zur Prozessstrukturierung und -systematisierung entlang des Flow-Charts (Abbildung 68) mit den generierten Arbeitssystemen, deren Outputs und ablaufenden Zusammenhängen wie folgt dar:

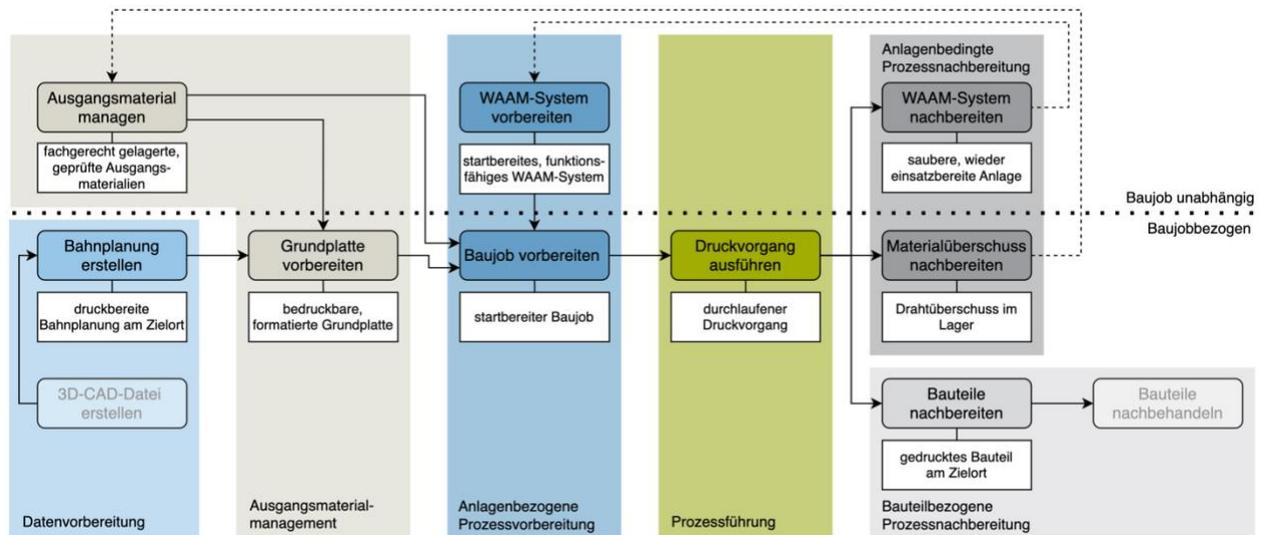


Abbildung 68: Prozesssystematisierung über Arbeitssysteme mit Outputs zum WAAM-Fertigungsprozess (A07)

Da davon ausgegangen wird, dass die spezifischen 3D-CAD-Dateien extern erstellt werden, beginnt die Betrachtung des WAAM-Fertigungsprozesses bei der Erstellung der Bahnplanung. Die erhaltene 3D-CAD-Datei gilt es zunächst in ein spezifisches Programm zu ‚Drahterodieren‘ zu importieren und die Geometrie entlang bestimmter Kriterien hinsichtlich der Herstellbarkeit zu prüfen. Daraufhin werden die Bahnplanungsparameter eingegeben und die Bahnplanung anhand definierter Regeln modifiziert. Diese wird weiter in einem Anlagensimulationsmodell gesichtet und anschließend mit definiertem NC-Dateipfad und ausgewähltem Post-Prozessor exportiert. Nachdem dadurch das Format und die Materialart der Grundplatte feststehen, kann diese hergerichtet werden. Zur Vorbereitung des Baujobs müssen die Schweißzusatzstoffe (Draht) und -hilfsstoffe (Gas) aus dem Lager geholt werden. Wichtig ist, dass die verwendeten Ausgangsmaterialien im Rahmen des Ausgangsmaterialmanagements – nach deren Bestellung – bei der Warenannahme mit dem Werkzeugeignis und dem Lieferschein kontrolliert und teilweise auch nachgemessen werden. Für die Vorbereitung des WAAM-Systems werden neben dem Starten des Systems der Temperatursensor ausgerichtet, der Prozessdatenscanner eingerichtet und die Absaugung positioniert. Zur konkreten Vorbereitung des Baujobs kann es aufgrund der sogenannten ‚Schwarz-Weiß-Trennung‘ notwendig sein, zuerst die verbaute ‚Seele‘ auszuwechseln. Des Weiteren werden zum Baujob das Gas und die Drahtzufuhr eingerichtet, die Grundplatte gespannt, das Kontaktrohr eingesetzt und geprüft sowie die Druck-Datei geladen. Abschließend wird ein ‚Dry-run‘ als Probelauf des Verfahrensweges durchgeführt, um festzustellen, ob die Grundplatte korrekt ausgerichtet und gespannt ist und der Verfahrensweg des Roboters stimmt. Mit erfolgreich ausgeführtem ‚Dry-run‘ kann der Druckvorgang gestartet werden und die

Fachkraft führt gelegentlich Sichtkontrollen der Schweißbahnen durch und überwacht die Zwischenlagentemperatur. Nachdem der Druckvorgang vollständig durchlaufen und das Bauteil abgekühlt ist, kann dieses entnommen und die Prozessdaten gesichert werden. Je nach Konstruktionsweise kann es vorkommen, dass die Grundplatte zur Montage des Bauteils dient oder entsprechend vom Bauteil abgetrennt werden muss. Gleiches gilt für die Nachbehandlung der Bauteiloberfläche. Nach dem Druckvorgang können zudem der Draht, das Gas und ggf. die Seele ausgebaut werden und der Roboter in die Home-Position verfahren sowie das System ausgeschaltet werden.

Für die eben dargestellte Beschreibung zum WAAM-Fertigungsprozess und der Analyse und Auswertung (Tabelle 40) wurden im Arbeitsablaufplan insgesamt 159 Tätigkeiten – davon 84 Haupttätigkeiten (HT), 75 vor- und nachbereitende Tätigkeiten (v-n-T) – expliziert. Hinsichtlich der Prozesssystematisierung wurden insgesamt 22 Sub-Arbeitssysteme (S-AS) und 9 Arbeitssysteme (AS) – ausgenommen der 3D-CAD-Datei-Erstellung und der Bauteil-Nachbehandlung – generiert.

Tabelle 40: Ergebnisse zur Prozessstrukturierung und -systematisierung des WAAM-Fertigungsverfahrens (A07)

Relevanter Bereich der DIN SPEC 17071:2019	Tätigkeiten		S-AS	AS
	HT	v-n-T		
Datenvorbereitung	n = 40		n = 5	n = 1
	n = 23	n = 17		
Ausgangsmaterialmanagement	n = 33		n = 5	n = 2
	n = 14	n = 19		
Anlagenbezogene Prozessvorbereitung	n = 56		n = 7	n = 2
	n = 31	n = 25		
Prozessführung	n = 6		n = 1	n = 1
	n = 6	n = 0		
Anlagenbedingte Prozessnachbereitung	n = 14		n = 2	n = 2
	n = 6	n = 8		
Bauteilbezogene Prozessnachbereitung	n = 10		n = 2	n = 1
	n = 4	n = 6		

Aus Tabelle 40 geht hervor, dass insbesondere die anlagenbezogene Prozessvorbereitung einen Großteil der observierten Tätigkeiten einnimmt. Diese münden in n = 7 Teilerzeugnissen der Sub-Arbeitssysteme, welche letztlich in n = 2 konkrete Arbeitssystem-Outputs zusammenfließen. Innerhalb der Datenvorbereitung, bei der lediglich das Arbeitssystem zur Erstellung der Bahnplanung generiert wurde, sind im Vergleich zu den anderen Bereichen eine hohe Anzahl an Sub-Arbeitssystemen und Tätigkeiten zugeordnet. Auffällig ist zudem, dass die Prozessführung und die anlagenbedingte Prozessnachbereitung mit nur einem Sub-Arbeitssystem je Arbeitssystem erzeugt werden konnten, was bedeutet, dass die Teilerzeugnisse mit den

Arbeitssystem-Outputs gleichgestellt sind. Mit der zusätzlichen Betrachtung der bauteilbezogenen Prozessnachbereitung wurden in allen drei Bereichen wenige Tätigkeiten – und hierbei vermehrt vor- und nachbereitende Tätigkeiten – expliziert. Tabelle 41 zeigt die Tätigkeiten des Arbeitsablaufplans unter fünf verschiedenen Betrachtungsperspektiven entsprechend ihrer Anzahl an Tätigkeiten.

Tabelle 41: Betrachtungsperspektiven der Tätigkeiten des Arbeitsablaufs (A07)

Betrachtungsperspektiven (BP)		Tätigkeiten	
		HT	v-n-T
1	Bauteilherstellung (exklusive Grundplatte vorbereiten)	n = 100	
		n = 59	n = 41
2	Bauteilvorbereitung	n = 84	
		n = 49	n = 35
3	Bauteilnachbereitung	n = 10	
		n = 4	n = 6
4	Materialvor- und -nachbereitung (exklusive Ausgangsmaterial managen)	n = 28	
		n = 9	n = 19
5	Anlagenvor- und -nachbereitung	n = 22	
		n = 12	n = 10

Die erste Perspektive (BP1) zeigt, dass n = 100 von den insgesamt n = 159 Tätigkeiten zur Herstellung des Bauteils – ausgenommen der Vorbereitung der Grundplatte – aufgebracht werden. Im Vergleich von Bauteilvorbereitung (BP2; n = 84) zur Bauteilnachbereitung /-behandlung (BP3; n = 10) ist ein deutlicher Schwerpunkt in der Vorbereitung zu erkennen. Dieser Effekt wurde bereits durch die Prozessbeschreibung und die Vielzahl an Teilerzeugnissen aus Tabelle 40 angedeutet und wird unter dieser Betrachtungsperspektive nochmals verstärkt. Hinsichtlich der Vor- und Nachbereitung des Materials (BP4; n = 28) werden im Vergleich zum Gesamtprozess wenige Tätigkeiten aufgewendet. Die Verteilung von Haupt- zu vor- und nachbereitenden Tätigkeiten unterscheidet sich hierbei deutlich. Die konkrete Vor- und Nachbereitung des WAAM-Systems (BP5; n = 22) ist mit ähnlich wenigen Tätigkeiten verbunden.

4.4.2.2 Phase II: Fehler- und Risikoanalyse

Innerhalb der Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (Tabelle 42) in Phase II wurden die Funktionen und Fehlfunktionen zu den Bauteileigenschaften mit insgesamt n = 6, zu den Prozessauswirkungen mit n = 44, auf Arbeitssystemebene mit n = 111 sowie auf Ursachenebene mit n = 234 erschlossen.

Tabelle 42: Gesamtübersicht der Funktionen und Fehlfunktionen des WAAM-Fertigungsprozesses (A07)

Art	Bauteil-eigenschaften	Prozess-auswirkung	Fehlerart (Arbeitssystem)	Fehlerursachen (5M-Prozesseinflüsse)
Funktionen	n = 2	n = 5	n = 32	n = 108
Fehlfunktionen	n = 4	n = 39	n = 79	n = 126 (43)

Mit der Fokussierung der Fehlerursachen (n = 83; n = 43 mit ‚Keine‘ ausgenommen) zeigt die Verteilung der Fehlfunktionen im Gesamtprozess (Abbildung 69), dass der Mensch mit n = 53 enthaltenen Fehlfunktionen mehr als die Hälfte der möglichen Fehler verursachen kann. Die Maschinen- (n = 15) und Methodenfehlfunktionen (n = 12) nehmen dabei einen ähnlichen Anteil ein. Das Material stellt deutlich den geringsten Anteil dar, da hierbei lediglich die Ebenheit und Sauberkeit der Grundplatte und des Drahtes dokumentiert wurden. Zu den Funktionen der Mitwelt wurden keine Fehlfunktionen abgeleitet, da das Fertigungsverfahren unter normalen industriellen Bedingungen nicht beeinflusst wird.

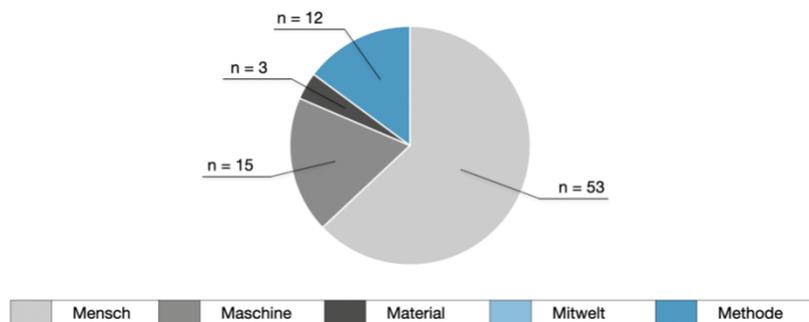


Abbildung 69: Verteilung der Ursachen-Fehlfunktionen der 5M-Prozesseinflüsse im Gesamtprozess (A07)

Mit der Verteilung der Fehlfunktionen der 5M-Prozesseinflüsse in den Arbeitssystemen (Abbildung 70) lassen sich Zentrierungen und Akzentuierungen erkennen.

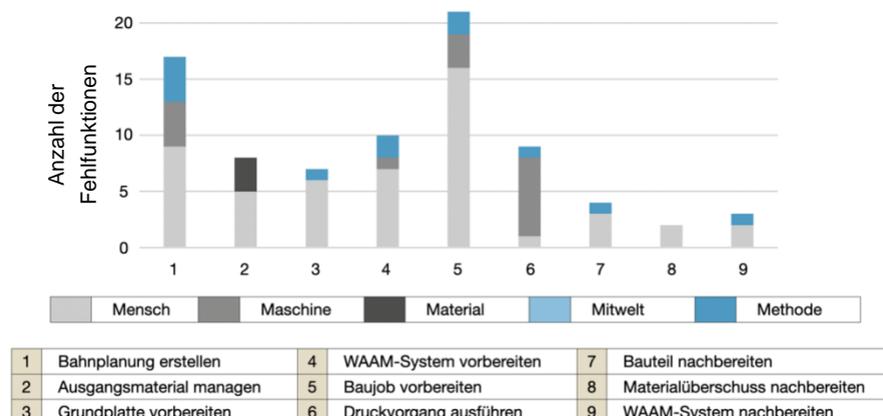


Abbildung 70: Verteilung der Fehlerursachen in den Arbeitssystemen (A07)

Hinsichtlich der Zentrierungen lassen sich der Materialanteil im Managen des Ausgangsmaterials (2), der Menschenanteil in der Baujobvorbereitung (5) und der Maschinenanteil im Druckvorgang

(6) feststellen. Die Materialien sind primär in der Vorbereitung der Grundplatte zu verorten. Wie bereits die Tätigkeitsauswertungen zeigen, ist die anlagenbezogene Prozessvorbereitung (4, 5) mit den häufigsten Tätigkeiten verbunden. Damit gehen eine Vielzahl an Fehlfunktionen des Menschen einher, welche dabei den Schwerpunkt in der Baujobvorbereitung setzen. Dieser Zusammenhang stellt sich in den nachbereitenden Arbeitssystemen (7 bis 9) ähnlich dar. Hervorzuheben ist, dass bei der Erstellung der Bahnplanung (1) die Summen aus Mensch, Maschine und Methode zusammenwirken. Hierbei sind insbesondere die Einstellungen zu den Bahnplanungsparametern und die Modifizierung der Bahnplanung zu nennen, welche mit Kriterienkatalogen und Tabellen zu Schweißparametersätzen hinterlegt sind. Auffällig ist dabei das Vorkommen der Maschine, welches sich durch das Verwenden eines Anlagenmodells in der CAD-Software begründet und die CAD-Komponenten (Abbildung 71) entsprechend der realen Komponenten korrekt hinterlegt sein müssen.

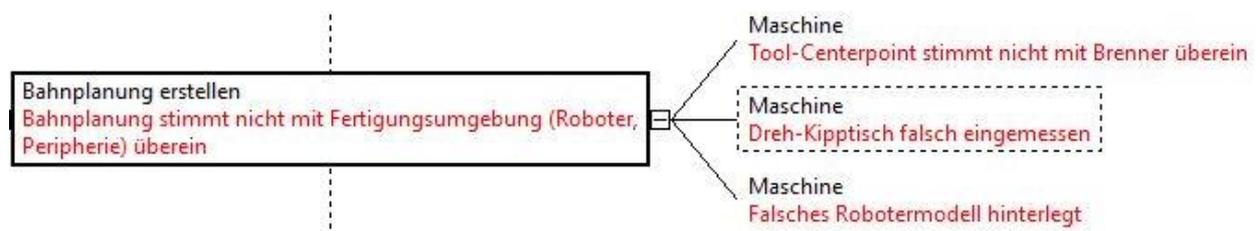


Abbildung 71: Fehlernetz und Fehlfunktionen der Maschinenkomponenten zur Erstellung der Bahnplanung

Mit der Betrachtung der Verteilung der Fehlfunktionen in den Arbeitssystemen (Abbildung 72) sind die gleichen Akzentuierungen in der Erstellung der Bahnplanung (1) und der Vorbereitung des Baujobs (5) vorhanden.

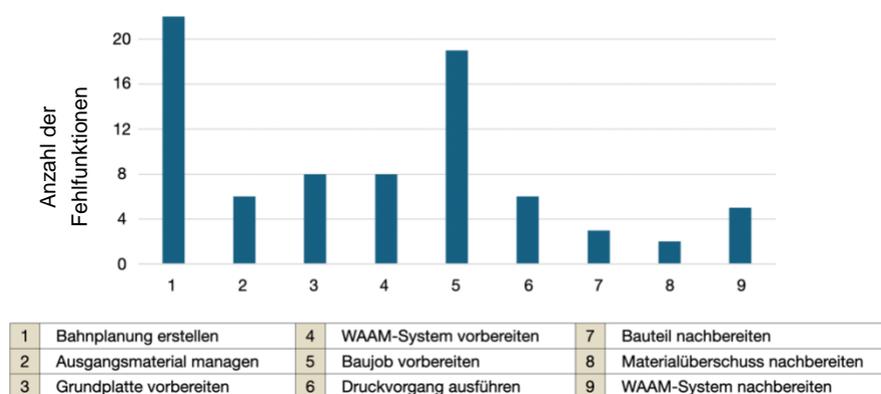


Abbildung 72: Verteilung der Fehlfunktionen der Arbeitssystemebenen im Gesamtprozess (A07)

Das bedeutet, dass an die Arbeitssystem-Outputs der druckbereiten Bahnplanung und des startbereiten Baujobs viele Anforderungen bestehen. Hervorzuheben ist in diesem Kontext zudem, dass zur Vorbereitung der Grundplatte (3) und des WAAM-Systems (4) mehr Fehlfunktionen als zum Druckvorgang (6) erschlossen wurden. Hinsichtlich der Verteilung der Fehlerursachen und der Verteilung der Fehlerarten sind deutliche Parallelen zu erkennen. Dies wird in deren Gegenüberstellung (Abbildung 73) deutlich.

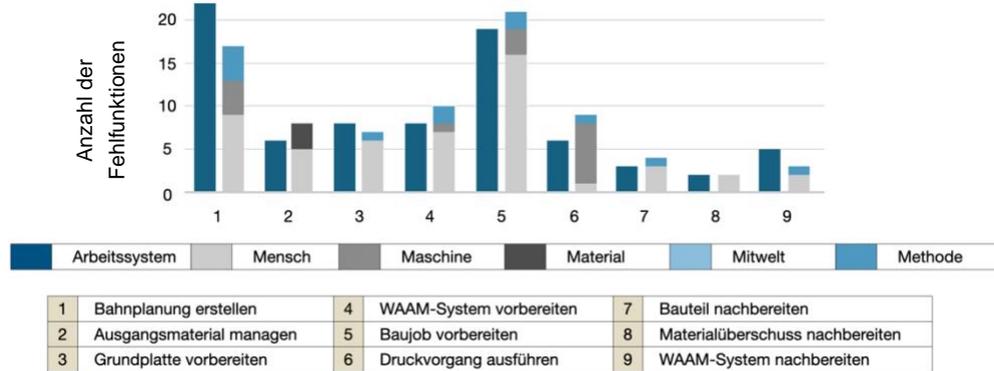


Abbildung 73: Gegenüberstellung der Ursachen- und Arbeitssystem-Fehlfunktionen in den Arbeitssystemen (A07)

Der Zusammenhang der Fehlfunktionen in der Baujobvorbereitung spiegelt sich unmittelbar im Fehlfunktionsnetz (Abbildung 74) wider. Dabei wird zudem die Zentrierung der Fehlfunktionen des Menschen deutlich. Die spezifischen Tätigkeiten des Menschen haben demnach spezifische Folgen für den Arbeitssystem-Output bzw. dessen Anforderungen.

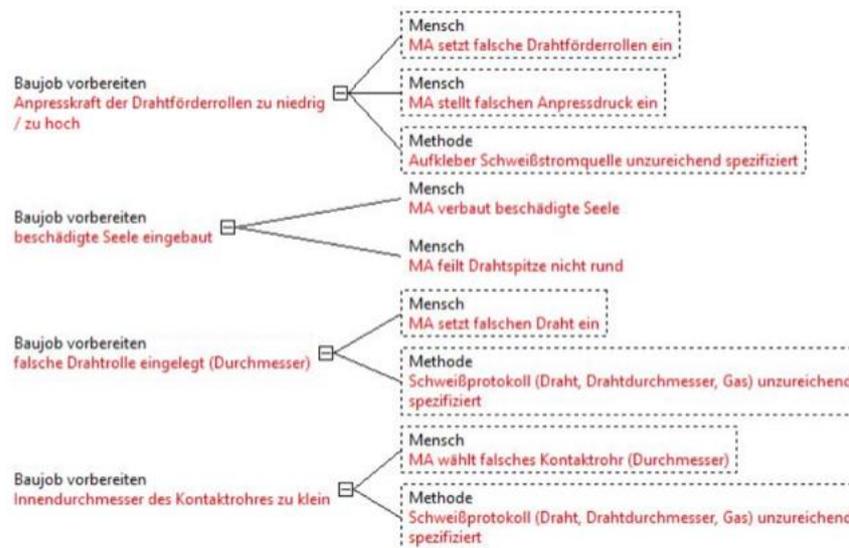


Abbildung 74: Auszug aus den Fehlernetzen zum Arbeitssystem: Baujob vorbereiten

Die Zentrierung der Maschinenkomponenten im Druckvorgang (6) zeigt im Fehlernetz (Abbildung 76) ebenfalls deren Zusammenwirken und verdeutlicht die Gegenüberstellung aus Abbildung 73.

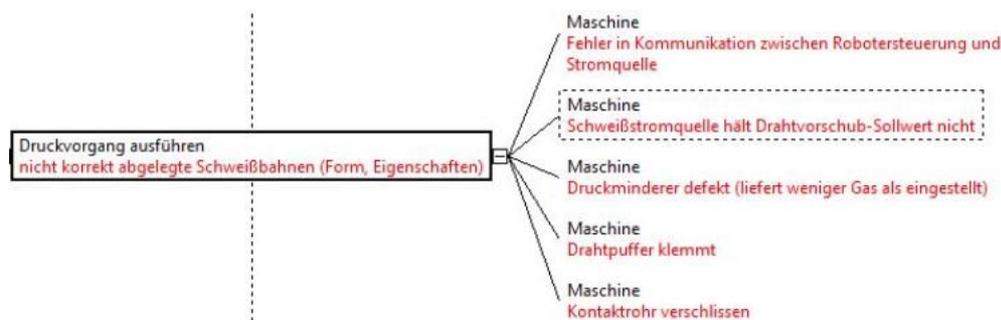


Abbildung 75: Auszug aus den Fehlernetzen zum Arbeitssystem: Druckvorgang ausführen

Neben der Parallelität zeigt sich in der Gegenüberstellung der Fehlfunktionen (Abbildung 73), dass zu den Arbeitssystemen der Bahnplanung (1) und der WAAM-Systemnachbereitung (9) mehr Fehlerarten als Fehlerursachen dokumentiert wurden. Der Grund hierfür wird im Fehlernetz ersichtlich und liegt in der detaillierten Aufschlüsselung der Auswirkungen (Abbildung 76).



Abbildung 76: Auszug aus den Fehlernetzen zum Arbeitssystem: Bahnplanung erstellen

Aus Abbildung 76 geht hervor, dass die unterschiedlichen Prozessauswirkungen auf die Raupenbeschaffenheit unmittelbar mit der Robotergeschwindigkeit – zu schnell oder zu langsam – zusammenhängen, jedoch die Ursache hierfür die gleiche ist. Dadurch entsteht der Überhang an Fehlfunktionen der Fehlerart gegenüber den Fehlerursachen.

Die Fehlfunktionen der Prozessauswirkung wurden dabei, wie in den FMEAs zuvor, in den vorgegebenen Funktionskategorien (Tabelle 43) dokumentiert. Die $n = 79$ Arbeitssystem-Fehlfunktionen münden dabei in $n = 39$ Prozessauswirkungen.

Tabelle 43: Verteilung der dokumentierten Fehlfunktionen zur Prozessauswirkung (A07)

Prozessabbruch	Prozesspause	Prozessdurchlauf	Auswirkung auf Folgedruck	Außerhalb der Betrachtung
n = 16	n = 5	n = 11	n = 3	n = 4

Auffällig ist, dass bei Eintreten von $n = 16$ Fehlfunktionen der Fertigungsprozess abgebrochen wird. Dies betrifft beispielsweise die Prozessauswirkungen einer Kollision des Roboters mit dem Bauteil oder der Grundplatte, Wulstbildung in der Schweißbahn oder Kollabierung der Schmelze. Bei $n = 11$ Fällen läuft der Prozess durch und die Funktionen werden mit den Bauteileigenschaften verknüpft. Ein Beispiel hierfür zeigt die Fehlfunktion „Drahtförderprobleme“ (Abbildung 77). Es wird ersichtlich, dass mehrere Fehlfunktionen der Baujobvorbereitung zur gleichen Fehlfunktion der Prozessauswirkung führen und dies wiederum geringfügige Auswirkungen auf die Materialeigenschaften hervorruft und die Geometrie nachbearbeitet werden muss.

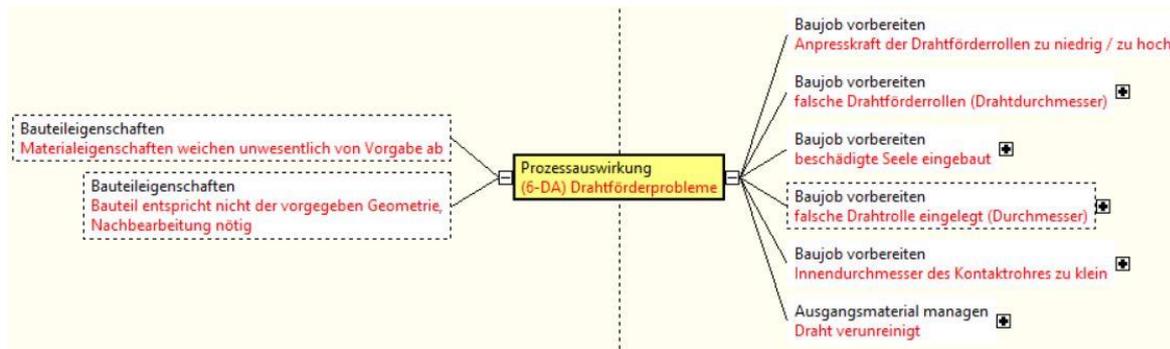


Abbildung 77: Auszug aus den Fehlernetzen zum Prozessauswirkung: Drahtförderprobleme

Ein weiteres Beispiel des Fehlernetzes zur Prozessauswirkung (Abbildung 78) zeigt, dass sich bereits die Bahnplanung und das Vorbereiten der Grundplatte auf die Bauteileigenschaften auswirken. Grund dafür ist, dass der Kontaktrohrabstand zu groß wird und dadurch zwar die Bauteileigenschaften nur unwesentlich abweichen, jedoch die vorgegebene Geometrie unbrauchbar wird.



Abbildung 78: Auszug aus den Fehlernetzen zum Prozessauswirkung: Kontaktrohrabstand zu groß

Die Verteilung der Fehlfunktionen zur Prozessauswirkung (Tabelle 43) zeigt zudem, dass in $n = 5$ Fällen eine Prozesspause – wie beispielsweise Zündprobleme – herbeigeführt wird, $n = 3$ Fehlfunktionen eine Auswirkung auf Folgedruck haben und die Prozessdaten nicht ausgewertet werden können. $N = 4$ Fehlfunktionen liegen außerhalb des Betrachtungsrahmens, da diese beispielsweise die Ökobilanz mit steigendem Stromverbrauch oder die Arbeitssicherheit betreffen.

Ausgehend von den Fehlfunktionsnetzten wurden in den Formblättern zur FMEA insgesamt $n = 258$ Vermeidungs- und Entdeckungsmaßnahmen dokumentiert und entlang des Risikobewertungskataloges bewertet. Die Maßnahmen-Ergebnisse (Tabelle 44) werden – gleich zur Ergebnisdarstellung zuvor – kategorisiert¹⁵ und entsprechenden deren Anzahl an Vorkommnissen zusammengefasst.

¹⁵ Ausgenommen der Überschneidungen von Fehlfunktionen zur Maschine, Mitwelt und Methode und unter Berücksichtigung der Mehrfachnennungen von Maßnahmen fließen in die Kategorisierung $n = 108$ Vermeidungs- und $n = 97$ Entdeckungsmaßnahmen ein. Die Begründung ist in Abschnitt 4.2.2.2 in Fußnote 10 nachzulesen.

Tabelle 44: Kategorisierung der Ergebnisse zu Vermeidungs- und Entdeckungsmaßnahmen

Vermeidungsmaßnahmen		Entdeckungsmaßnahmen	
Schulungen des Personals	n = 43	Offensichtliche Erkennung	n = 20
Spezielle Prozessmaßnahmen	n = 4	Prüfung, Kontrolle	n = 42
Etabliertes Verfahren, Methode	n = 13	Feedback im Prozess	n = 4
Keine	n = 7	Keine	n = 12
Lieferung, Prüfung durch Dritte	n = 5	Kontrolle durch Dritte	n = 2
Regelmäßige Säuberung, Prüfung und/oder Wartung	n = 5		
Dokumentationen und Arbeitsplatzeinrichtung	n = 12		

Aus den Vermeidungsmaßnahmen wird ersichtlich, dass zur Vorbeugung von menschlichen Ursachenfehlern die häufigste Maßnahme über die Schulung des Personals (n = 42) erfolgt. Hierzu sind ebenfalls spezifische und allgemeine Schulungen und/oder Einweisungen in Form von Briefings zu nennen. Spezielle Prozessmaßnahmen, durch beispielsweise die Verwendung hochwertiger Komponenten, werden zur Vermeidung von n = 4 Ursachenfehlfunktionen eingesetzt. Die etablierten Verfahren oder Methoden (n = 13) beziehen sich unter anderem auf die Warenannahme oder wurden durch Vorversuche erprobt. In n = 7 Fällen liegt keine Vermeidungsmaßnahme vor und wurden entsprechend mit der Höchstbewertung vermerkt. Weiter werden regelmäßige Säuberungen, Prüfungen und/oder Wartungen (n = 5) durchgeführt. Hinzu kommen Prüfungen oder Lieferungen durch Dritte n = 5. Ebenfalls wurden die mögliche Kategorie der Dokumentation und die Einrichtung des Arbeitsplatzes in n = 12 Fällen als Vermeidungsmaßnahme erwähnt. Die Verwendung des Schweißprotokolls ist hierbei essenziell. Ebenso befinden sich Aufkleber mit Daten zu den Drahtförderrollen und dem Anpressdruck unmittelbar am Roboter bzw. an der Schweißstromquelle. Die häufigsten Maßnahmen zur Entdeckung von Fehlern sind Prüfungen oder Kontrollen (n = 42). Hinzu kommen Kontrollen durch Dritte (n = 2). Dominierend ist ebenfalls die offensichtliche Erkennung bei Auftreten des Fehlers (n = 20). Zudem werden Fehler über das Feedback im Prozess (n = 4) entdeckt. In n = 12 konkreten Fällen liegt keine Entdeckungsmaßnahme vor und wurden mit dem höchsten Risiko bewertet.

Diese Fehlerzusammenhänge und deren Bewertungen wurden in den Formblättern zu den Arbeitssystemen hinsichtlich der Aufgabenpriorität insgesamt n = 30 mit Hoch (H), n = 51 mit Mittel (M) und n = 35 mit Niedrig (N) eingestuft. Zu n = 13 Zusammenhängen wurde keine RPZ oder Aufgabenpriorität errechnet, da diese aufgrund des Betrachtungsumfangs ohne Bewertung eingetragen wurden. Ausgehend von dieser Aufgabenpriorität (Abbildung 79) können die Experten den Prozess entsprechend verbessern.

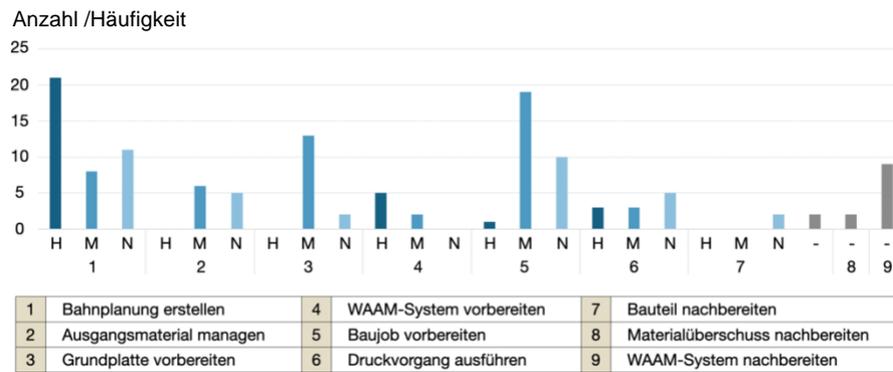


Abbildung 79: Risikobewertung über die Aufgabenpriorität entlang der Arbeitssysteme (A07)

Abbildung 79 zeigt, dass insbesondere bei der Bahnplanung ein hoher Optimierungsbedarf besteht, da hier häufig keine Vermeidungsmaßnahmen vorliegen oder lediglich eine Einweisung in Form eines Briefings stattfindet. Zum Zeitpunkt der FMEA-Durchführung wurde bereits die Erstellung eines Kriterienkatalogs zur Modifizierung der Bahnplanplanung erwähnt und in den aktuellen Bewertungen nicht berücksichtigt. Dies würde in den weiteren Schritten zur Optimierung das Risiko senken. Zudem wurde eine hohe Aufgabenpriorität in der Vorbereitung des WAAM-Systems und des Baujobs und im Druckvorgang errechnet. Die Fehlfunktionen der Baujobvorbereitungen mit deren Bewertungen stellen überwiegend eine mittlere Priorität dar. Diese Bewertungen sind hinsichtlich der folgenden Kompetenzanalyse bzw. -generierung nicht von Relevanz und zeigen den AMC-Experten den Weiterentwicklungsbedarf auf.

4.4.2.3 Phase III: Kompetenzanalyse/-generierung

Zum Ergebnis der Kompetenzmatrix wurden die Arbeitssysteme entsprechend deren Anzahl in $n = 9$ berufliche Handlungen überführt und insgesamt $n = 217$ Wissensaspekte expliziert. Das korrespondierende Wissen (Abbildung 80) gliedert sich dabei in $n = 149$ Wissensaspekte zum Sachwissen (SW), $n = 24$ zum Prozesswissen (PW) und $n = 44$ Aspekte zum Reflexionswissen (RW) erster Ebene.

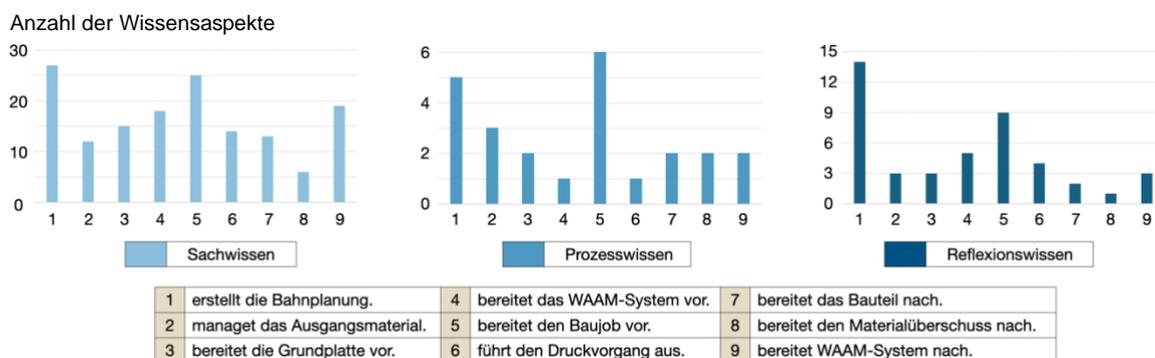


Abbildung 80: Verteilung der Wissensaspekte innerhalb der beruflichen Handlungen (A07)

Die Verteilung in den Wissenskategorien zeigt jeweils Akzentuierungen in der Erstellung der Bahnplanung und der Vorbereitung des Baujobs. Der Verlauf des Sachwissens stellt sich ähnlich dem des Reflexionswissens dar. Das Prozesswissen nimmt in den Handlungen 2–4 ab, wohingegen das Sachwissen und Reflexionswissen zunehmen. Mit der Fokussierung auf das

Prozesswissen und das Reflexionswissen sind das Managen des Ausgangsmaterials (2) und das Vorbereiten der Grundplatte (3) mit mehreren beruflichen Handlungssequenzen und wenigen Verständniszusammenhängen verbunden. Bei der Vorbereitung des WAAM-Systems (4) und dem Ausführen des Druckvorgangs (6) ist dies gegenteilig festzustellen. Zu den jeweils $n = 1$ Wissensaspekt des Prozesswissens wurden $n = 5$ Aspekte (RW; 4) bzw. $n = 4$ (RW; 6) des Reflexionswissens identifiziert. In den Bereichen der bauteilbezogenen (7) und anlagenbedingten Prozessnachbereitung (8, 9) sind im Vergleich zur Anzahl an Prozesswissensaspekten dem Reflexionswissen wenige Aspekte zugeordnet. Die Anhäufung in der WAAM-Systemnachbereitung bezieht sich dabei eher auf ökonomische und arbeitssicherheitstechnische Aspekte. Wie Abbildung 80 zeigt, liegt zum WAAM-Fertigungsverfahren ebenfalls ein Schwerpunkt in der Prozessvorbereitung. Hier sind insbesondere die Vorbereitung des Baujobs und die Erstellung der Bahnplanung zu nennen. Hervorzuheben ist hierbei die Bahnplanung, in welcher zu $n = 5$ beruflichen Handlungssequenzen insgesamt $n = 14$ Verständniszusammenhänge identifiziert wurden. Auf die Summe der beruflichen Handlungen betrachtet sind die Wissensaspekte hinsichtlich des Reflexionswissens in deren Anzahl im WAAM-Fertigungsprozess von großer Bedeutung.

4.4.2.4 Phase IV: Wissensarbeit und Informationsverarbeitung

Mit Phase IV wurden 1) der Grad an potenziell enthaltener Wissensarbeit in den Arbeitssystemen erhoben, 2) das auftretende Arbeitssystem der Fehler der Prozessauswirkungen in den Fehlfunktionen dokumentiert sowie 3) die Informationsmärkte der Ursachen-Fehlfunktionen erschlossen und in einem Fehlerkatalog zusammengeführt.

1) Den Einschätzungen des Experten (Abbildung 81) nach fallen die Arbeitssysteme: ‚Bahnplanung erstellen‘ (1) und ‚Druckvorgang ausführen‘ (6) in den originären Bereich von Wissensarbeit,

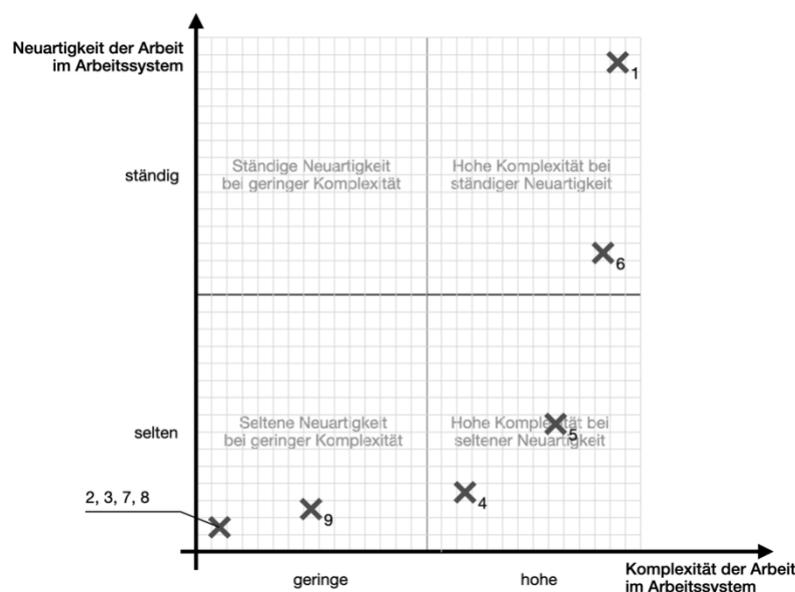
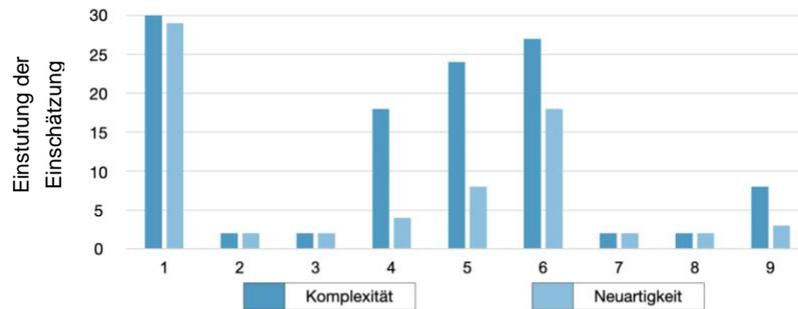


Abbildung 81: Einschätzung des Experten zum Grad an potenziell enthaltener Wissensarbeit (A07)

‚Baujob vorbereiten‘ (6) und ‚WAAM-System vorbereiten‘ (4) in den Bereich der hohen Komplexität bei seltener Neuartigkeit. Fünf der neun Arbeitssysteme wurde in den Bereich der Wissensarbeit im Einzelfall eingeschätzt. Dies betrifft konkret ‚Ausgangsmaterial managen‘ (2), ‚Grundplatte vorbereiten‘ (3), ‚Bauteil nachbereiten‘ (7), ‚Materialüberschuss nachbereiten‘ (8) und ‚WAAM-System nachbereiten‘ (9). Kein Arbeitssystem wurde zum Bereich der ständigen

Neuartigkeit bei geringer Komplexität eingeschätzt. Die numerische Überführung und grafische Aufbereitung hinsichtlich Komplexität und Neuartigkeit der Arbeit je Arbeitssystem (Abbildung 82) zeigt, dass die Komplexität der Einschätzungen nach in der Erstellung der Bahnplanung (1), der Vorbereitung des WAAM-Systems (4) und Baujobs (5) sowie im Druckvorgang (6) deutlich ausgeprägt ist.

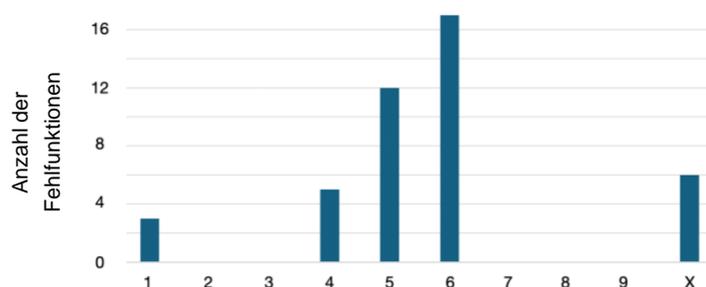


1	Bahnplanung erstellen	4	WAAM-System vorbereiten	7	Bauteil nachbereiten
2	Ausgangsmaterial managen	5	Baujob vorbereiten	8	Materialüberschuss nachbereiten
3	Grundplatte vorbereiten	6	Druckvorgang ausführen	9	WAAM-System nachbereiten

Abbildung 82: Ergebnis zu Einschätzung der Komplexität und Neuartigkeit der Arbeit in den Arbeitssystemen (A07)

Die Komplexität und Neuartigkeit der Aufgabe im Arbeitssystem ‚Bahnplanung erstellen‘ (1) sind auf den aktuellen Forschungsschwerpunkt, die händische Modifikation des Verfahrensweges des Roboters sowie die aktuelle Erstellung eines Kriterienkatalogs zurückzuführen. Auffällig ist, dass hier ebenfalls bei ähnlicher Neuartigkeit die Komplexität der WAAM-Systemvorbereitung (4) im Vergleich zur -nachbereitung (9) höher eingeschätzt wurde. Dies ist auf das Einrichten des Pyrometers zurückzuführen, da mit diesem die Zwischenlagentemperatur gemessen wird. Die Vorbereitung des Baujobs (5) wurde mit den Handhabungen und damit verbunden mit der Fehlerhäufigkeit als neuartig und als deutlich komplex eingeschätzt. Im Kontrast zu den bisherigen Ergebnissen steht die Ausführung des Druckvorgangs (6). Die Expertin betont, dass insbesondere hier die möglichen Fehlfunktionen ihre Auswirkung zeigen.

2) Dies wird unmittelbar im Auftreten der Fehlfunktionen der Prozessauswirkung (Abbildung 83) deutlich.



1	Bahnplanung erstellen	4	WAAM-System vorbereiten	7	Bauteil nachbereiten
2	Ausgangsmaterial managen	5	Baujob vorbereiten	8	Materialüberschuss nachbereiten
3	Grundplatte vorbereiten	6	Druckvorgang ausführen	9	WAAM-System nachbereiten
				X	Bauteil-Endkontrolle

Abbildung 83: Ergebnisse zum Fehlerauftreten in den Arbeitssystemen (A07)

Abbildung 83 zeigt, dass neben dem Druckvorgang (6) das nächsthäufigste Auftreten von möglichen Fehlern in der Baujobvorbereitung (5) eintritt. Dies ist auch mit dem darin durchgeführten ‚Dry-run‘ begründet. Auffällig im Vergleich zu den anderen Fertigungsverfahren ist, dass merklich weniger Fehler erst bei einer möglichen Bauteil-Endkontrolle (X) auftreten. Dies steht mit der Häufigkeit im Druckvorgang (6) in Zusammenhang. Das Fehlerauftreten in der Erstellung der Bahnplanung (1) ergibt sich aus Programm-Fehlermeldungen und der Simulation im Anlagenmodell. Die Fehlfunktionen der WAAM-Systemnachbereitung zeigen sich dabei unmittelbar im Auftreten in der WAAM-Systemvorbereitung (4).

3) Das Ergebnis zum Fehlerkatalog (Tabelle 45) wurde zu den oben genannten $n = 5$ Arbeitssystemen (inklusive Bauteil-Endkontrolle) erstellt. Hierzu wurden jeweils die möglichen Fehlfunktionen der Prozessauswirkung (FP; $n = 43$), die unterschiedlichen Arten an Fehler-Arbeitssystemen (FA; $n = 24$), die relevanten Fehlfunktionen (FF; $n = 99$), die unterschiedlichen Arten an Informationsmärkten (IM; $n = 92$) sowie die Anzahl an möglichen Kontextfaktoren (KF; 195) aufgelistet. Der Fehlerkatalog ist – wie aus Abbildung 83 hervorgeht – insbesondere für die Vorbereitung des WAAM-Systems (4) und des Baujobs (5) sowie für den Druckvorgang (6) relevant. Zudem kann dieser bei einer möglichen Bauteilendkontrolle (X) herangezogen werden.

Tabelle 45: Auflistung der Ergebnisse zu den Vorkommnissen im Fehlerkatalog (A07)

Nr.	betroffenes Arbeitssysteme	FP	FA	FF	IM	KF
1	Bahnplanung erstellen	3	2	4	9	9
4	WAAM-System vorbereiten	5	4	10	8	18
5	Baujob vorbereiten	12	6	23	23	41
6	Druckvorgang ausführen	17	6	48	34	107
X	Bauteilprüfung /-Endkontrolle	6	6	14	18	20

Die Tabelle 45 bestätigt nochmals die Komplexität im Druckvorgang, da die $n = 17$ möglichen auftretenden Fehler aus $n = 6$ unterschiedlichen Arbeitssystemen stammen und sich dabei Einwirkungen aus $n = 48$ möglichen Arbeitssystem-Fehlfunktionen ergeben. Dadurch kann die Nachverfolgung in 34 unterschiedlichen Informationsmärkten entlang der 107 möglichen Kontextfaktoren erfolgen. Die Kontextfaktoren sind dabei mit den spezifischen Informationsmärkten verbunden, so dass die Fachkraft entsprechend eine konkrete Recherche durchführen kann. Gleiches wurde im Rahmen des Fehlerkataloges für die Arbeitssysteme 1, 4 und 5 und die mögliche Bauteil-Endkontrolle zusammengetragen.

Mit der Fokussierung der Informationsmärkte und der bereits begründeten kategorischen Betrachtung der Ergebnisse (Tabelle 46) liegen aktuell $n = 7$ mögliche Kategorien vor. Diese enthalten insgesamt $n = 32$ Arten an unterschiedlichen Informationsquellen. Im Zusammenhang mit den gesamten Kontextfaktoren wurden die Arten in insgesamt $n = 337$ Fällen genannt. Aus Tabelle 46 geht hervor, dass zum WAAM-Fertigungsverfahren insbesondere die Wissensobjekte in der Anzahl an Arten und Nennungen von Relevanz sind. Hervorzuheben ist dabei das

Schweißprotokoll, welches bereits $n = 54$ der $n = 116$ Nennungen einnimmt. Zudem sind die interne ($n = 66$) und externe ($n = 48$) Kommunikation hervorzuheben. Hierzu wurden der interne Kontakt zu Dokumentenerstellern sowie Kollegen und Experten und ein Schweißfachmeister genannt. Zu den externen Kontakten zählen spezifische Hersteller. In $n = 42$ Fällen kann auf $n = 7$ Arten auf Realien der AMC-Umgebung zurückgegriffen werden. Dies betrifft insbesondere die Aufkleber, die unmittelbar an den WAAM-Komponenten befestigt sind. Dies sind beispielsweise Aufkleber zu den Arten an Drahtförderrollen mit Drahtdurchmesser und den Einstellungen zur Anpresskraft. Zudem zählen weitere Komponenten wie die Einprägungen am Kontaktrohr, die Beschriftungen und die farbliche Kennzeichnung von Gasflaschen etc. Weniger oft wird auf Anleitungen, Handbücher oder Dokumente sowie Fachliteraturen ($n = 29$) zurückgegriffen. Ähnlich stellt sich die Recherche im Internet bzw. in Foren ($n = 25$) dar. In $n = 11$ Nennungen müssen neue Versuche durchgeführt werden.

Tabelle 46: Kategorische Darstellung der Informationsmärkte mit Anzahl an Arten und Nennungen (A07)

Informationsmärkte	Arten	Nennungen
Anleitungen	6	29
Anleitungen: WAAM-System, Roboter, Prozessdatenscanner; Handbuch Pyrometer, Softwaredokumente, Literatur		
Realien in AMC-Umgebung	7	42
Aufkleber: Drahtförderrolle, Drahtrolle, Material, Schweißstromquelle; Einmessprotokoll, Kontaktrohr, Gasflasche, Lagerstand, Lieferschein, Manometer, Materialstempel, Schutzglas, Seele, Werkszeugnis		
Online	2	25
Internet, Foren		
Wissensobjekte	8	116
Schweißprotokoll, Übergabezettel, Logdaten, BT-Tabelle, Kriterienkatalog, Lagentemperatur, Simulationsmodell, Dateibezeichnung		
Dritte kontaktieren	3	48
Hersteller: Roboter, Software, Komponentenspezifisch		
Interne kontaktieren	5	66
Ersteller: Schweißprotokoll, Übergabezettel, Bahnplanung; Kollege/Experte; Schweißfachmeister		
Neuversuche	1	11
Neue Versuche		

5 Zusammenfassung, Diskussion und Ausblick

5.1 Reflexion und Aktualisierung zum Forschungsstand

Um das Forschungsthema herzuleiten und eine übergeordnete Zielperspektive zu entwickeln, wurde eine Bilanzierung entlang zweier Suchvorgänge durchgeführt, die damit den aktuellen, diesbezüglichen Forschungsstand abbildet. Der Suchvorgang 1 bezog sich konkret auf Kompetenzen zur Additiven Fertigung im Bauwesen und ergab lediglich $n = 24$ Literaturen. Diese zeigten unterschiedliche Ausrichtungen auf und konnten hierbei keine fundierten kompetenzbezogenen Anhaltspunkte liefern. Im erweiterten Suchvorgang 2 zu Kompetenzen in der Additiven Fertigung konnten innerhalb der $n = 492$ Funde ebenfalls ähnliche charakteristische Ausrichtungen identifiziert werden. Die themenferne Kategorie bezog sich auf 3D-gedruckte Modelle, die 3D-Technik oder Simulationen, die im lehrbezogenen Kontext eingesetzt sowie evaluiert wurden und bei denen der Fokus dabei nicht auf der Vermittlung AM-spezifischer Kompetenzen lag. Weiter wurde eine technik- bzw. materialbezogene Ausrichtung festgestellt, welche diese Perspektive nur selten überschritt. Zudem bezogen sich Literaturen eher allgemein auf die Additive Fertigung und beschrieben mögliche Auswirkungen und Trends, griffen die „aktuelle“ Praxis auf oder erläuterten konkrete Fälle der Anwendung. In den Studien, in denen Lehrkonzepte entwickelt oder evaluiert wurden bzw. die auf die Professionalisierung von (Grundschul-)Lehrkräften angelegt wurden, konnte keine explizite Aufführung AM-bezogener Kompetenzen festgestellt werden. Zudem wurden innerhalb der Suchvorgänge Werke gefunden, die lediglich Teilfacetten der additiven Fertigung betrachten – hierbei primär im Design-Bereich – sowie Werke, die dezidiert kompetenzbezogene bzw. qualifikatorische Aspekte von AM konkretisieren, jedoch hierbei dem Kompetenzanspruch – vor dem Hintergrund einer empirischen Sozialforschung – nur stark eingeschränkt begegnen.

Eine überschlägige Aktualisierung dieses Forschungsstandes zeigt, dass diese Ausrichtungen weiterhin bestehen. Darunter ist beispielsweise das siebenteilige „Springer Handbook of Additive Manufacturing“ (Pei et al., 2023) zu nennen, welches als Leitfaden für Unternehmen die wichtigsten Grundlagen der Additiven Fertigung sowie detailliert und umfangreich fortgeschrittene Anwendungen und AM-Prinzipien aufzeigt. Innerhalb des sechsten Teils „Education and Training“ werden EU-geförderte Projekte zu Qualifikations- und Normanforderungen in der Additiven Fertigung dargestellt, die Berufsbildung und akademische Ausbildung für die additive Fertigung in Deutschland beleuchtet, eine innovative Ausbildung zur Unterstützung der Einführung der additiven Fertigung beschrieben sowie ein Überblick über das Programmangebot der Additiven Fertigung in den Vereinigten Staaten gegeben. Diese Teilkapitel gehen dabei auf die Probleme, Herausforderungen, Strategien und Umsetzungsstände der Bildung ein und umreißen neue Qualifizierungen und AM-Skills, die benötigt werden. Petersen und Leupold (2023) weisen dabei konkrete Kompetenzanforderungen der Additiven Fertigung aus und greifen hinsichtlich des Verständnisses zu Qualifikation, Kompetenz und beruflichem Wissen auf Rauner (2010) zurück. Bei genauerer Betrachtung der ausgewiesenen Kompetenzanforderungen (Petersen & Leupold,

2023, S. 868 ff.) stellen diese lediglich allgemeine Beschreibungen zu AM-Prozessschritten dar. Diese werden für den Abgleich von relevanten Inhalten mit beruflichen sowie weiteren Qualifizierungs- und Studienprogrammen verwendet, um herauszufinden, wie viele Inhalte mit der aktuellen beruflichen Bildung und den Programmen bereits abgedeckt werden. Diese Kompetenzbeschreibungen erscheinen für den vorgesehenen Abgleich ausreichend, repräsentieren jedoch für eine konkrete Identifikation und Widerspiegelung umfangreicher AM-Kompetenzen nur bedingt den erforderlichen Kompetenzanspruch. Offen bleibt zudem, inwiefern der inhaltlichen Aktualität des Handbuches und den Weiterentwicklungen der Technologien begegnet wird.

Weitere aktuelle Studien beziehen sich hingegen auf Beschreibungen zu Hard- und Soft-Skills. Beispielsweise definieren Melo, et al. (2023, S. 320 ff.) Hard-Skills, wie Technologie- und Materialkenntnisse, die Fähigkeit zur Teileidentifikation sowie ein grundlegendes Verständnis der Prozesskette in AM. Zu den Soft-Skills werden die Bereitschaft zum offenen Gedankenaustausch, die Teamfähigkeit in Verbindung mit guten Kommunikationsfähigkeiten, eine gewissenhafte Arbeitsweise und die richtige Einstellung genannt. Bolpagni, et al. (2024) beschreibt Hard-Skills über das Verständnis zur effektiven Erfassung, Erstellung, Verwaltung, Überprüfung und Speicherung von Daten mit Hilfe fortschrittlicher Konzepte und die hierbei unterstützenden Soft Skills zum Aufbau von effektiven zwischenmenschlichen Beziehungen und der Verfolgung eines menschenzentrierten Ansatzes. Diese folgen den drei übergeordneten Clustern zu Technologien, Konzepten/Methoden und sozialen Kompetenzen. Wie aus den exemplarischen Auszügen hervorgeht, werden hier ebenfalls lediglich Orientierungspunkte geliefert. Die benötigte Tiefe sowie die interdependenten, kompetenzrelevanten Zusammenhänge und eine ausreichende kompetenzbezogene Fundiertheit werden nur deutlich eingeschränkt umgesetzt. Die übergeordnete Forschungsfrage bzw. das übergeordnete Forschungsziel zur fundierten Erschließung von Kompetenzanforderungen, die bereits in der Entwicklung innovativer, prozessorientierter Technologien ansetzt, zeigt nach wie vor eine hohe Relevanz, welcher durch aktuelle Studien nicht begegnet wird. Der Ansatz zur vorliegenden Forschungsarbeit zeigt jedoch, dass für die Erschließung von Kompetenzanforderungen eine vertiefte Auseinandersetzung mit den spezifischen AM-Gegebenheiten, den verwendeten Technologien und deren vielschichtigen Zusammenhängen unumgänglich ist. Entscheidend ist hierbei, dass dies mit der Hinterlegung eines tragfähigen, handhabbaren Kompetenzkonzeptes und entsprechender Diagnostik verbunden ist und darauf ausgerichtet gezielte Implikationen notwendig sind.

5.2 Zusammenfassung und Diskussion zum Forschungsansatz

Der in der vorliegenden Arbeit entwickelte Forschungsansatz spiegelt sich in vier konkreten Phasen wider, die aus einem theorieintegrativen Arbeitsmodell und dessen Erweiterung abgeleitet wurden. Hierfür wurden die Instrumentarien und Vorgehensweisen der theoretischen Leitlinien zu 1) Kompetenzen, 2) Additiver Fertigung sowie 3) (Analyse-)Ansätzen technischer Prozesse zusammengeführt.

- 1) Ausgangspunkt und damit zur Schärfung der übergeordneten Zielperspektive beitragend ist das theoretisch abgestützte sowie empirisch erprobte technikdidaktische Kompetenzmodell zu fachlich-methodischen Kompetenzen nach Tenberg, et al. (2019) mit entsprechender Diagnostik im Rekonstruktionsansatz nach Pittich (2013). Hinsichtlich der wahrnehmbaren Anreicherung mit überfachlichen Kompetenzen, der Wissensarbeit und Informationsverarbeitung wurden die Konzepte nach Hube (2005) sowie Kuhlen und Semar (2023) hinzugezogen.
- 2) Die Leitlinie zur additiven Fertigung konkretisiert den Untersuchungsgegenstand und zeigt die aktuell für das Bauwesen relevanten Fertigungsverfahren und -methoden auf. Zudem wird der Entwurf zur Normung des qualitätsgesicherten Additiven Fertigungsprozesses DIN 17071:2019-12 erläutert.
- 3) Die (Analyse-)Ansätze technischer Prozesse greifen auf die FMEA aus der präventiven Qualitätssicherung, den MTO-Ansatz aus dem Bereich der Arbeits- und Organisationspsychologie, die Arbeitssysteme nach REFA und DIN EN ISO 6385:2016-12 sowie Theorien zum Fertigungs-/Arbeitsablaufplan zurück.

Die konzeptionelle Integration dieser Leitlinien zum Arbeitsmodell erfolgte in fünf Transformationsschritten, deren Erweiterung mit zwei zusätzlichen Schritten. Rahmendes Element hierzu ist der MTO-Ansatz, der in dessen erster Ebene auf die Analyse eines AMC-Verfahrens bezogen wurde (Schritt 1). Innerhalb der zweiten Ebene wurden die Organisationseinheiten mit den relevanten, qualitätsgesicherten Bereichen der DIN SPEC 17071:2019 vorstrukturiert und der Auftragsdurchlauf – vom Design bis zum finalen Produkt – diesen Bereichen entsprechend unterteilt (Schritt 2). Das Arbeitssystem als zentrales und verbindendes Element des Ansatzes wurde zum einen konkretisiert und die Begrifflichkeiten geschärft sowie zum anderen in drei Systemebenen gegliedert (Schritt 3). Mit dieser Implikation ist die Strukturanalyse eingeleitet und führt zur Integration einer arbeitssystembasierten FMEA (Schritt 4). Abschließend wurde der Arbeitsablauf des kleinsten Arbeitssystems (Sub-Arbeitssystem) mit der Dokumentation über den Arbeitsablaufplan angereichert (Schritt 5). Bezüglich der Erweiterung des Arbeitsmodells wurde die Vierfeldertafel zur Wissensarbeit nach Hube (2005) auf die Komplexität und Neuartigkeit der Arbeit innerhalb eines Arbeitssystems bezogen (Schritt 6) und die Betrachtungsperspektive des Modells zur Be- und Verarbeitung von Wissensobjekten vor dem Hintergrund einer Informationsgenerierung und -nutzbarmachung angepasst (Schritt 7).

Die Arbeitsmodelle und deren Umsetzung innerhalb des methodischen Vorgehens führen sukzessiv zur Beantwortung der Forschungsfragen. Neben der Vorbereitung und Planung der Analysen in Phase 0 wird den Handhabungs- und Problemlöseprozessen (Forschungsfrage 1) insbesondere über die Prozessbeobachtung und die Prozessstrukturierung entlang des Arbeitsablaufplans sowie die Prozesssystematisierung mit dem Arbeitssystembaum in Phase I und die Fehler- und Risikoanalyse zur FMEA in Phase II begegnet. Die daran anschließende Phase III nutzt die umgesetzte Datenbasis und identifiziert bzw. überführt die relevanten Aspekte des Arbeitsablaufplans, des Arbeitssystembaums, der (Fehl-)Funktionen sowie Fehlernetze der FMEA entlang der Grundidee des Rekonstruktionsansatzes in die fachlich-methodische

Kompetenzmatrix. Dies führt unmittelbar zu den AMC-Kompetenzprofilen und damit zur Beantwortung der Forschungsfrage 2. Mit der Umsetzung des erweiterten Arbeitsmodells und den Einschätzungen zur Wissensarbeit, den auftretenden Fehlfunktionen sowie den relevanten Informationsmärkten wird der Forschungsfrage 3 begegnet und damit die Informationsgenerierung und -nutzbarmachung zur Sicherung einer operativen Handlungsfähigkeit über die Fehlernachverfolgung mit einem Fehlerkatalog ermöglicht.

Die Pilotierung des Forschungsansatzes wurde einerseits dafür genutzt, das Vorgehen in einer AMC-Umgebung zu erproben und geringfügige Optimierungen vornehmen zu können, sowie andererseits, um die Instrumentarien mit den Ergebnissen zu überprüfen. Neben der Einhaltung wissenschaftlicher Gütekriterien qualitativer Forschung nach Mayring (2016) erfolgte im Rahmen der Masterarbeit von Borowsky (2024) eine Inter-Rater-Reliabilitätsprüfung. Diese bezog sich auf die Explikation der Prozessbeobachtung in den Arbeitsablaufplan, die Generierung des Arbeitssystembaums und die Identifikation der Wissensaspekte in der Kompetenzmatrix. Das methodische Vorgehen wurde im empirischen Entwicklungsfeld der AMC-Verfahren am SCA- und WAAM-Fertigungsprozess durchgeführt und entsprechend zwei Kompetenzprofile mit Fehlerkatalogen erzeugt.

Mit der Pilotierung und den zwei weiteren Umsetzungen im empirischen Entwicklungsfeld können sowohl 1) Stärken und 2) Schwächen als auch 3) Chancen und 4) Risiken zum Ansatz diskutiert werden:

1) Stärken

Da sich die AMC-Verfahren zum Zeitpunkt der Umsetzung des Ansatzes noch in Entwicklung befinden, stellt die Strukturierung und Systematisierung des Fertigungsprozesses mit umfangreicher Dokumentation der Gegebenheiten und Zusammenhänge eine der zentralen Stärken des Ansatzes dar. Die dabei in sich verifizierenden Schleifen und Rücksprachen mit den Experten führen sukzessive zur Vertiefung der Daten und greifen die Einflüsse und Auswirkungen in deren Komplexität ab. Diese ermöglichen eine gezielte Optimierung und Weiterentwicklung der AMC-Fertigungsprozesse und können weitere Forschungsbedarfe aufdecken. Dadurch entsteht mit der Umsetzung des Ansatzes ein großer Benefit für die Experten. Aus kompetenzbezogener bzw. technikdidaktischer Perspektive können mit diesen Daten Kompetenzprofile generiert werden, welche durch die ganzheitliche Betrachtung und den Aufbau der AMC-Kompetenzmatrizen unmittelbar mit den Teilkompetenzen als Lernzielen für entsprechende berufliche Aus-/Fort- und Weiterbildungen oder Qualifizierungsprogramme aufgegriffen bzw. fortgeführt werden können. Da die FMEA in der FMEA-Software ein „lebendiges Dokument“ darstellt und auch der Arbeitssystembaum und Arbeitsablaufplan über die Iteration der Schritte permanent an die spezifischen Gegebenheiten angepasst werden können, besteht die Möglichkeit damit einerseits die Prozesse sowie andererseits die Kompetenzprofile fortlaufend zu aktualisieren. Diese interdisziplinäre Zusammenarbeit mit beidseitigen Benefits repräsentiert eine Zukunftsaufgabe der Forschung.

2) Schwächen

Die Umsetzung des Ansatzes ist mit hohen Aufwänden verbunden und als Schwäche zu vermerken. Bei einer zweitägigen Prozessbeobachtung ergibt sich hinsichtlich der Erhebungen, Analysen, Aufbereitung und Besprechungen ein Arbeitsaufwand von circa 80–90 Stunden – exklusive interne Besprechungen und organisationale Absprachen. Die hierbei umgesetzte Betrachtungstiefe zur FMEA könnte zudem durchaus noch umfangreicher und detaillierter gestaltet werden. Aktuell werden die Auswirkungen auf die Bauteileigenschaften mit lediglich zwei Funktionen zu Geometrie und Materialeigenschaften sowie jeweils mit zwei Fehlfunktionen zu ‚unbrauchbar‘ und ‚Nachbearbeitung nötig‘ dokumentiert. Auf Ursachenseite könnten zudem notwendige Toleranzen der 5M-Prozesseinflüsse ergänzt werden. Hinsichtlich der Grundlagenforschung zu den AMC-Verfahren und vor dem Hintergrund einer Kompetenzdiagnostik ist diese Betrachtungstiefe aktuell ausreichend und würde die Aufwände mit steigendem Detaillierungsgrad deutlich erhöhen.

3) Chancen

Hinsichtlich der Chancen zum Ansatz können die Stärken genutzt und den Schwächen begegnet werden. Das bedeutet, dass mit einer frühzeitigen Einbindung und Anwendung des Ansatzes in die Entwicklung der AMC-Verfahren lediglich die erste Umsetzung zeitintensiv ist. Mit der Möglichkeit einer fortlaufenden Aktualisierung der Daten werden absehbar weniger Aufwände erforderlich. Zudem kann mit der Entwicklungsbegleitung der Detaillierungsgrad erhöht werden. Hierüber können genaue Dokumentationen zu den vorliegenden Arbeitsständen abgegriffen werden. Zu diskutieren gilt es dabei, inwiefern ein erhöhter Detaillierungsgrad für die Generierung von Kompetenzprofilen erforderlich ist und sich bereits die Risikobewertung als alleiniger Benefit zur Optimierung des Fertigungsprozesses und zur Entdeckung von Weiterentwicklungsbedarfen für den Experten darstellt. Offene Fragen ergeben sich dabei, wie diese Informationen für die Kompetenzanforderungen oder hinsichtlich einer Fortführung der Kompetenzmatrix genutzt werden können. Dennoch bietet die weitere Detaillierung die Anschlussfähigkeit für andere Disziplinen wie beispielsweise Ressourceneffizienz, Normung und Standardisierung oder Arbeitssicherheit. Das Potenzial, das hinter den Arbeitssystemen steckt, wird dabei aktuell noch nicht vollumfänglich ausgeschöpft.

4) Risiken

Als Risiko kann konnotiert werden, dass die Korrektheit und Vollständigkeit der erhobenen Daten von den Angaben und Verständnissen der Experten abhängig sind. Dem Ansatz wird dabei insofern begegnet, indem bei der Umsetzung ein zweiter, außenstehender Experte (erfahrener Bauingenieur) involviert ist und dieser als ‚Critical Friend‘ die Verständnisse und Zusammenhänge hinterfragt. Zudem stellt die Moderation zur Erhebung der Daten einen bedeutsamen Teilaspekt des Ansatzes dar. Um dem zu begegnen, wurde zum Ansatz ein Handbuch (siehe Anhang) verfasst, welches mit konkreten Leitfragen und Ankerbeispielen hinterlegt ist.

5.3 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse

Die Ergebnisse des Forschungsansatzes kennzeichnen sich unmittelbar durch die darin umgesetzten Instrumentarien. Dies betrifft den Arbeitsablaufplan mit Arbeitssystembaum aus Phase I, die FMEA aus Phase II, die Kompetenzmatrix aus Phase III sowie den Grad an potenziell enthaltener Wissensarbeit und den Fehlerkatalog aus Phase IV. Phase I und II liefern dabei die Erkenntnisse zu den 1) Handhabungs- und Problemlöseprozessen aus Forschungsfrage 1, Phase III zu den 2) fachlich-methodischen Kompetenzprofilen aus Forschungsfrage 2 und Phase IV zur 3) Informationsgenerierung und -nutzbarmachung zur Sicherung der operativen Handlungsfähigkeit aus Forschungsfrage 3.

1) Wie stellen sich die Handhabungs- und Problemlöseprozesse im Kontext von AMC-Umgebungen dar?

Die Vorstrukturierung in die relevanten Bereiche des qualitätsgesicherten Additiven Fertigungsprozesses entlang der DIN SPEC 17071:2019 und damit die Einteilung in Organisationseinheiten zeigte sich in allen Ergebnissen der ersten beiden Phasen als schlüssige und passende Zuordnungsmöglichkeit. Das bedeutet, dass die Handhabungs- und Problemlöseprozesse entlang dieser Strukturierung dokumentiert werden konnten und über die analysierten Fertigungsprozesse hinweg ein einheitliches Grundraster liefern. Mit der induktiven Arbeitssystemgenerierung aus den observierten Tätigkeiten und deren Differenzierung in „Baujob unabhängig“ und „Baujobbezogen“ zeichnet sich eine Kohärenz innerhalb der Arbeitssystemebene und deren Outputs ab. Die AMC-Fertigungsprozesse und deren Handhabungen (Abbildung 84) stellen sich verallgemeinert wie folgt dar:

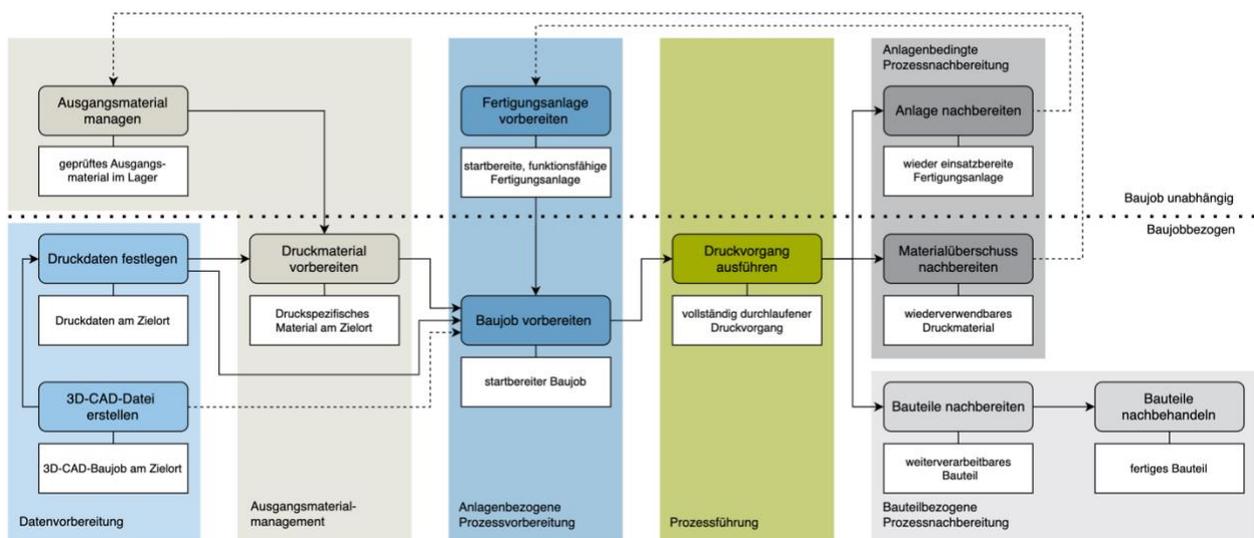


Abbildung 84: Prozesssystematisierung über Arbeitssysteme mit Outputs zu AMC-Fertigungsprozessen

In allen untersuchten Verfahren wird als Ausgangspunkt eine 3D-CAD-Datei benötigt, die den virtuellen Baujob abbildet. Diese kann vom Kunden selbst oder nach Kundenvorgabe konstruiert werden und muss die jeweiligen AMC-Spezifika der Herstellbarkeit berücksichtigen. Im Rahmen

der Datenvorbereitung werden neben der Druckdatei die Druckdaten benötigt. Wie dem WAAM-Fertigungsprozess zu entnehmen ist, steht die Bahnplanung in direkter Verbindung mit den Schweißparametern. Im SCA-Fertigungsprozess sind dies die verschiedenen Geschwindigkeiten mit der Schichtdicke, der Materialmischung und dem Wasserdruck. Das bedeutet in beiden Fällen, dass hier die konkreten Druckdaten festgelegt werden und hier sowohl druck- als auch bauteilspezifische Gegebenheiten beachtet werden müssen. Hinzu kommt das Managen des Ausgangsmaterials, bei dem ausreichendes, geprüftes Material im Lager vorhanden sein sollte. Für den Baujob werden hierbei die relevanten Materialien vorbereitet. Im Fall des WAAM-Verfahrens ist dies die Grundplatte, im SCA-Verfahren die Materialmischung. Zudem erfolgt vor dem Ausführen des Druckvorgangs das Vorbereiten einer funktionsfähigen Fertigungsanlage und des datenspezifischen Baujobs im Rahmen der anlagenbedingten Prozessvorbereitung. Nach dem Druckvorgang gilt es, die Bauteile, den Materialüberschuss sowie die Anlage nachzubereiten. Zudem können (WAAM) bzw. müssen (SCA) die Bauteile nachbehandelt werden.

Mit dem Fokus auf die Tätigkeiten in den Handhabungsprozessen geben diese mit der Betrachtung unterschiedlicher Perspektiven (Tabelle 47) erweiterte Einblicke in die drei untersuchten Verfahren. Hierbei werden die Gemeinsamkeiten und Unterschiede der Verfahren mit deren fertigungsspezifischen Handhabungen deutlich.

Tabelle 47: Zusammenfassung der Tätigkeiten aus den Betrachtungsperspektiven der Fertigungsverfahren

Betrachtungsperspektiven (BP)		Tätigkeiten		
		SCA-P	SCA	WAAM
1	Bauteilherstellung (exklusive Druckmaterial vorbereiten)	n = 94	n = 84	n = 100
2	Bauteilvorbereitung	n = 52	n = 41	n = 84
3	Bauteilnachbereitung/-behandlung	n = 28	n = 28	n = 10
4	Materialvor- und -nachbereitung (exklusive Ausgangsmaterial managen)	n = 99	n = 82	n = 28
5	Anlagenvor- und -nachbereitung	n = 26	n = 29	n = 22

Tabelle 47 zeigt, dass die Tätigkeiten zur Vorbereitung des Bauteils (BP-2) im Vergleich zur Nachbereitung und Nachbehandlung (BP-3) über die drei untersuchten Fertigungsverfahren hinweg einen deutlichen Schwerpunkt einnehmen. Die Bauteilvorbereitung (BP-2), die Bauteilnachbereitung und -behandlung (BP-3) sowie die Materialvor- und -nachbereitungen (BP-4) des SCA- und WAAM-Fertigungsverfahrens stehen jedoch in einem deutlichen Kontrast zueinander. Dies begründet sich in BP-2 durch die aufwendige Bearbeitung der Bahnplanung sowie in BP-3

durch das fast fertige Bauteil nach dem Druck ohne notwendige Nachbehandlung. Bezüglich BP-4 ist hier die tätigkeitsintensive Vorbereitung der Materialmischung (SCA) im Vergleich zur Grundplatte (WAAM) zu nennen. In der Gegenüberstellung der Tätigkeiten der SCA-Pilotierung (SCA-P) und dem SCA-Fertigungsprozess von A01 ergeben sich wenige Unterschiede. Da bei der Erstellung der 3D-CAD-Daten in SCA-P mehrere Programme verwendet werden, entsteht hier primär die höhere Tätigkeitsanzahl in der Bauteilherstellung (BP-1) und der Bauteilvorbereitung (BP-2). Die Mehrzahl an Tätigkeiten der BP-4 ergibt sich in SCA-P durch die Nachbereitung des Materialüberschusses, da sich diese in SCA automatisierter darstellt.

Im Rahmen der Problemlöseprozesse werden die möglichen Fehler und deren Zusammenhänge fokussiert und eine arbeitssystembasierte FMEA entlang der sechs ausgewiesenen Schritte umgesetzt. Als Zusammenfassung und zur Diskussion werden dabei zunächst die Verteilung der Ursachen aus den 5M-Prozesseinflüssen (Abbildung 85) mit den Vermeidungs- und Entdeckungsmaßnahmen gegenübergestellt.

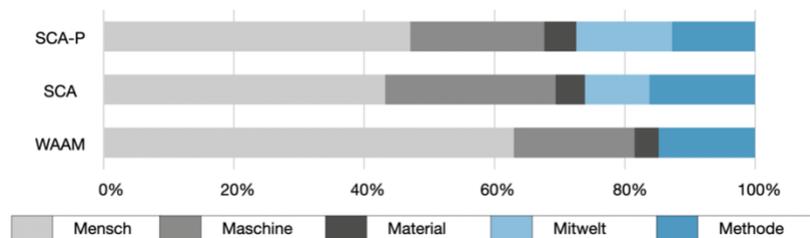


Abbildung 85: Verteilung der 5M Ursachen-Fehlfunktionen der Fertigungsverfahren

Abbildung 85 zeigt, dass der Mensch in den beiden SCA-Fertigungsverfahren über 40 % und im WAAM-Fertigungsverfahren sogar über 60 % der möglichen Fehlfunktionen verursacht. In Anbetracht der aktuellen und primär genannten Vermeidungsmaßnahmen (SCA-P: n = 50; SCA: n = 35; WAAM: n = 43) mit Schulungen des Personals wird die Relevanz und Notwendigkeit dieser Forschungsarbeit nochmals bestärkt. Zudem kommen die häufig gelisteten Entdeckungen möglicher Fehler durch regelmäßige oder stichprobenartige Prüfungen und Kontrollen (SCA-P: n = 44; SCA: n = 37; WAAM: n = 42) hinzu, die insbesondere auch mit den menschlichen und den maschinellen Fehlfunktionen in Verbindung stehen. Zu den Maschinen-Fehlfunktionen werden vorbeugend regelmäßige Säuberungen, Prüfungen und/oder Wartungen (SCA-P: n = 7; SCA: n = 6; WAAM: n = 5) durchgeführt. Diese Maßnahmen werden ebenfalls vom Menschen ausgeführt. Zum WAAM-Verfahren werden zusätzlich explizit Prüfungen und Kontrollen durch Dritte umgesetzt. Hier zeigt sich, dass im Bereich der Robotik bereits auf die in der Industrie eingesetzten Maschinen zurückgegriffen werden kann und die Maschine zur SCA-Anlage in dessen Verfahren für das Bauwesen neu entwickelt wurde bzw. weiterentwickelt wird. Dabei werden zu vereinzelt SCA-Anlagenkomponenten ebenfalls Wartungen von bestimmten Herstellern durchgeführt. Zur Vermeidung der Fehlfunktionen des Materials und der Methodik werden häufig Dokumentationen durchgeführt oder der Arbeitsplatz entsprechend eingerichtet (SCA-P: n = 12; SCA: n = 20; WAAM: n = 12) sowie auf etablierte Verfahren und Methoden (SCA-P: n = 2; SCA: n = 16; WAAM: n = 13) zurückgegriffen. Die Maßnahmen, bei denen aktuell keine

Vermeidungs- und Entdeckungsmaßnahmen vorliegen, zeigen sich unmittelbar in der Risikobewertung hinsichtlich einer hohen Aufgabenpriorität. Abschließend zu den Fehlfunktionen und Maßnahmen ist hervorzuheben, dass die offensichtliche Erkennung der Fehler (SCA-P: n = 38; SCA: n = 43; WAAM: n = 20) sowie keine Entdeckung der Fehler (SCA-P: n = 7; SCA: n = 14; WAAM: n = 12) mehrfach erwähnt wurden und hierbei Überschneidungen zu den Prozessauswirkungen entstehen. Beispielsweise wurde die Entdeckung durch eine Fehlermeldung in der Software unmittelbar auch in der Prozessauswirkung dokumentiert. Diese Überschneidung der Ergebnisse sollte konsequent mitgedacht und aufeinander abgestimmt werden. Die sich dadurch ergebenden Redundanzen sind dabei angesichts unterschiedlicher Analyseperspektiven von Vorteil.

Die Prozessauswirkungen wurden in die vorgegebenen Funktionskategorien „Prozessabbruch“, „Prozesspause“, „Prozessdurchlauf“, „Auswirkung auf Folgedruck“ und „Außerhalb der Betrachtung“ eingeordnet und liefern mit deren Dokumentation die konkreten Folgen der Arbeitssystem-Fehlfunktionen auf den Prozess. Die Fehlfunktionen der Funktionskategorie „Prozessdurchlauf“ werden dabei weiter mit den Fehlfunktionen der Bauteileigenschaften vernetzt. Abbildung 86 zeigt hierzu die aktuellen Prozessauswirkungen der Funktionskategorie (ausgenommen ‚Außerhalb der Betrachtung‘).

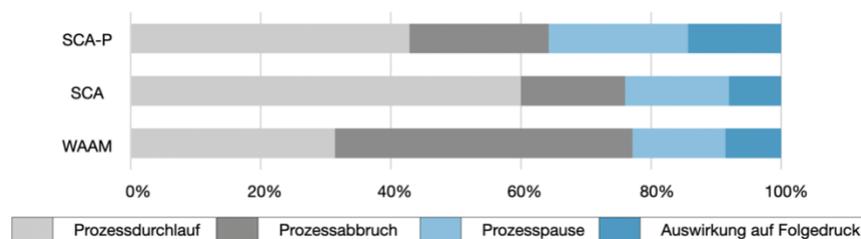
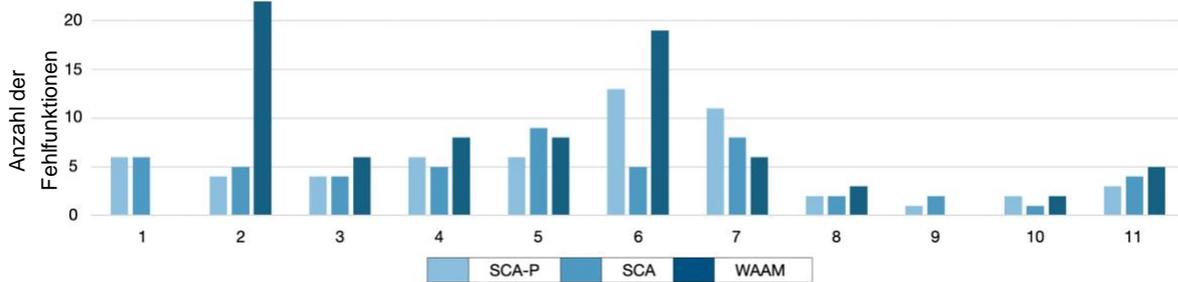


Abbildung 86: Verteilung der Prozessauswirkungen der Fertigungsverfahren

Daraus wird ersichtlich, dass im Vergleich der Fertigungsverfahren in WAAM die wenigsten Fehlfunktionen im Prozessdurchlauf und die meisten Fehlfunktionen im Prozessabbruch dokumentiert wurden – im Kontrast hierzu steht SCA. Die Prozesspause sowie die Auswirkungen auf den Folgedruck zeigen sich insgesamt mit einem geringen Anteil. Vor dem Hintergrund der Zehnerregel der Fehlerkosten gilt es für die Experten bzw. im Prozess, die möglichen Fehler in einer Prozesspause zu beheben oder einen Prozessabbruch hervorzurufen und einen Prozessdurchlauf sowie die Auswirkungen auf Folgedrucke gering zu halten.

Die konkreten Zusammenhänge der Fehlfunktionen werden in den Fehlernetzen ersichtlich. Eine gegenüberstellende Betrachtung der Fehlernetze ist aufgrund deren Spezifika in den Verfahren nicht zielführend, geschweige denn möglich. Die Verteilung der Arbeitssystem-Fehlfunktionen der Fertigungsverfahren (Abbildung 87), das bedeutet, die Anforderungen an die entstehenden Outputs können jedoch mit deren potenziell möglichen Fehlern zusammengetragen und diskutiert werden. Dabei wurden die WAAM-Arbeitssysteme entsprechend der verallgemeinerten Prozesssystematisierung (Abbildung 84) zugeordnet und in der Legende zur Abbildung 87 zusammengetragen.



1	3D-CAD-Datei erstellen	4	Materialmischung vorbereiten Grundplatte vorbereiten	7	Druckvorgang ausführen	10	Materialüberschuss nachbereiten
2	Material- /Prozessparameter festlegen, Druck-/ Mischdaten festlegen, Bahnplanung erstellen	5	Anlage vorbereiten, WAAM-System vorbereiten	8	Bauteil nachbereiten	11	Anlage nachbereiten, WAAM-System nachbereiten
3	Ausgangsmaterial managen	6	Baujob vorbereiten	9	Bauteil nachbehandeln		

Abbildung 87: Verteilung der Arbeitssystem-Fehlfunktionen der Fertigungsverfahren

Die Verteilung zeigt einen ähnlichen Verlauf über die Verfahren hinweg. Hervorzuheben ist dabei zum einen die Akzentuierung in WAAM bezüglich der Erstellung der Bahnplanung (2). Im Vergleich zu den SCA-Fertigungsverfahren ist hier die Festlegung der Daten bzw. Parameter (2) in Tabellen mit deutlich weniger Anforderungen verbunden. Zum anderen zeigt die Vorbereitung des Baujobs (6) sowohl innerhalb der SCA-Fertigungsverfahren als auch im Vergleich zu WAAM die größten Differenzen. Der Unterschied von SCA-P zu SCA begründet sich primär dadurch, dass in SCA bereits Druckparameterprofile hinterlegt sind und die jeweiligen Parameter in SCA-P händisch eingegeben werden. Dadurch wurden zu SCA lediglich die Anforderung des korrekten Druckparameterprofils und in SCA-P die jeweiligen Parameter in ihrer Abweichung dokumentiert. Die Anzahl an Fehlfunktionen in WAAM ist ebenfalls auf die vielen händischen, baujobspezifischen Tätigkeiten zurückzuführen. Die Arbeitssysteme mit ihren Fehlerzusammenhängen stellen dabei eine bedeutsame Grundlage für die Generierung der Kompetenzprofile dar.

2) Wie stellen sich fachlich-methodische Kompetenzprofile von Menschen in AMC-Umgebungen dar?

Die Kompetenzprofile in den AMC-Umgebungen werden über die fachlich-methodische Kompetenzmatrix abgebildet. Zur Analyse und Generierung dieser AMC-relevanten Kompetenzen wurden in Phase III die Daten der Phasen I und II über zehn konkrete Schritte in die Matrix überführt. Hierbei bezogen sich die Schritte 1 und 2 auf die Zuordnung und Vorstrukturierung des Kompetenzprofils und der dritte Schritt auf die Überführung der Arbeitssysteme in berufliche AMC-Handlungen. Dementsprechend wurden zu SCA-P $n = 11$, zu SCA $n = 11$ und zu WAAM $n = 9$ berufliche Handlungen dokumentiert. Die Schritte 4 bis 10 ergänzten die korrespondierenden Sach-, Prozess- und Reflexionswissensaspekte aus dem Arbeitsablaufplan, dem Arbeitssystembaum und der FMEA. Abbildung 88 zeigt hierzu die Verteilung der Wissensanteile in den Fertigungsverfahren.

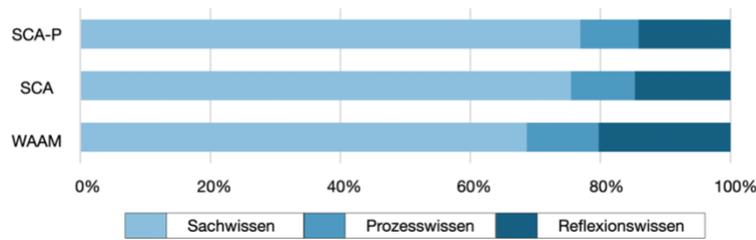
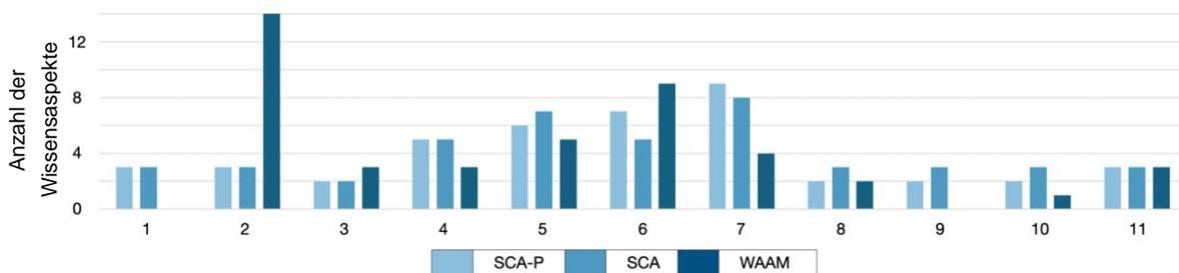


Abbildung 88: Verteilung der Wissensanteile in den Fertigungsverfahren

Wie aus Abbildung 88 hervorgeht, wurden in der Analyse die meisten Wissensanteile zum Sachwissen expliziert. Dies ist durch die Auflistung einer Vielzahl an Anlagenelementen, Werkzeugen und Hilfsmitteln mit Mehrfachnennungen begründet. Die aus den Sub-Arbeitssystemen und den FMEA-Funktionen abgeleiteten Prozesswissensaspekte nehmen den geringsten Anteil ein. Deutlich mehr wurden aus den Fehlerzusammenhängen zum Reflexionswissen identifiziert. Die Wissensanteile der Fertigungsverfahren stellen sich zueinander relativ ausgewogen dar. Dabei wurden zu WAAM gegenüber den SCA-Verfahren anteilig weniger Sachwissen und mehr Reflexionswissen expliziert. Hervorzuheben ist, dass bei wenigen Prozesswissensaspekten eine hohe Anzahl an Reflexionswissen – insbesondere in WAAM – vorhanden ist. Das bedeutet, dass in den AMC-Umgebungen die vielschichtigen Verständniszusammenhänge eine exponierte Stellung hinsichtlich der erforderlichen Kompetenzen einnehmen. Aus der Verteilung der Reflexionswissensaspekte in den Arbeitssystemen der Fertigungsverfahren (Abbildung 89) werden die Schwerpunkte dieser Verständniszusammenhänge ersichtlich.



1	3D-CAD-Datei erstellen	4	Materialmischung vorbereiten Grundplatte vorbereiten	7	Druckvorgang ausführen	10	Materialüberschuss nachbereiten
2	Material- /Prozessparameter festlegen, Druck-/ Mischdaten festlegen, Bahnplanung erstellen	5	Anlage vorbereiten, WAAM-System vorbereiten	8	Bauteil nachbereiten	11	Anlage nachbereiten, WAAM-System nachbereiten
3	Ausgangsmaterial managen	6	Baujob vorbereiten	9	Bauteil nachbehandeln		

Abbildung 89: Verteilung der Reflexionswissensaspekte in den Arbeitssystemen der Fertigungsverfahren

Abbildung 89 zeigt, dass sich über die Fertigungsverfahren hinweg größtenteils kohärente Verteilungen ergeben. Insbesondere SCA-P und SCA zeigen lediglich einmal eine Varianz von maximal $n = 2$ Wissensaspekten in der Baujobvorbereitung (6) und sind auf die fertigungsspezifische Handhabung zurückzuführen. Schwerpunkte der Verständniszusammenhänge liegen dabei in der Anlagenvorbereitung (5), der Baujobvorbereitung (6) und dem Druckvorgang (7). Das WAAM-Verfahren nimmt im Vergleich zum SCA-Verfahren in der

Baujobvorbereitung merklich zu und im Druckvorgang ab. Zu diskutieren ist dabei, dass die Vorbereitung der Materialmischung (3) in den SCA-Verfahren mehr Reflexionswissensaspekte als der Druckvorgang (7) im WAAM aufzeigt. Verständniszusammenhänge, die im Druckvorgang (7) des WAAM erforderlich wären, verlagern sich zum einen durch die Prüfung im Anlagenmodell in die Bahnplanung (2) und zum anderen mit dem ‚Dry-run‘ in die Baujobvorbereitung (6). Arbeitssystem-Fehlfunktionen, die ursprünglich im Druckvorgang (7) verortet wären, kommen durch die Verlagerung der Anforderungen an vorherige Prüfungen bzw. Kontrollen prozesseitig früher zu tragen. Die Erstellung der Bahnplanung (2) setzt dabei, wie zuvor bei den Fehlfunktionen der Arbeitssysteme, einen deutlichen Akzent. Die Fehlerzusammenhänge mit den dahinterliegenden Verständnissen ermöglichen die Anschlussfähigkeit zur potenziell enthaltenen Wissensarbeit im Arbeitssystem und die umgesetzte Informationsverarbeitung.

3) Wie stellt sich die Informationsgenerierung und -nutzbarmachung zur Sicherung einer operativen Handlungsfähigkeit in AMC-Umgebungen dar?

Zur Beantwortung der Forschungsfrage 3 wurden das erweiterte Arbeitsmodell umgesetzt und hierbei die Einschätzungen der Experten zur Komplexität und Neuartigkeit der Arbeit in den Arbeitssystemen, das auftretende Arbeitssystem zu den Fehlfunktionen der Prozessauswirkung sowie die Informationsmärkte erschlossen. Als Grundlage zur Beschreibung der Informationsgenerierung und -nutzbarmachung zur Sicherung der operativen Handlungsfähigkeit wurde das angepasste Modell zur Informationsverarbeitung (siehe Abbildung 32) herangezogen und auf die auftretenden Fehlfunktionen der Prozessauswirkung angewendet. Die dadurch entstandenen Fehlerkataloge greifen die Fehlfunktionen der Prozessauswirkungen (FP) als Bezugsproblem auf, liefern die potenziell relevanten Informationen über die damit verbundenen Arbeitssysteme (AS) und deren verknüpfte Fehlfunktionen (FF) und setzen die relevanten Informationsmärkte (IM) in Verbindung mit den Kontextfaktoren (KF). Mit der Fokussierung dieser Struktur in den Ergebnissen der Fehlerkataloge (Abbildung 90) lassen sich drei Stufen feststellen. Innerhalb der ersten Stufe verhält sich die Strukturierung in einem ausgewogenen Verhältnis und betrifft die meisten Datenreihen des Fehlerkatalogs. Zur Stufe 2 ist eine bemerkbare Zunahme der möglichen Kontextfaktoren gegenüber den Informationsmärkten vorhanden. Dies betrifft die Ausführung des Druckvorgangs in SCA und die Baujobvorbereitung in WAAM. Innerhalb der dritten Stufe sind bereits mehrere Fehlfunktionen der Arbeitssysteme als potenziell relevante Informationen vorhanden und die Anzahl an Informationsmärkten gegenüber den Kontextfaktoren nimmt deutlich zu. Dies betrifft die Bauteil-Endkontrolle in SCA-P und SCA sowie die Ausführung des Druckvorgangs in WAAM.

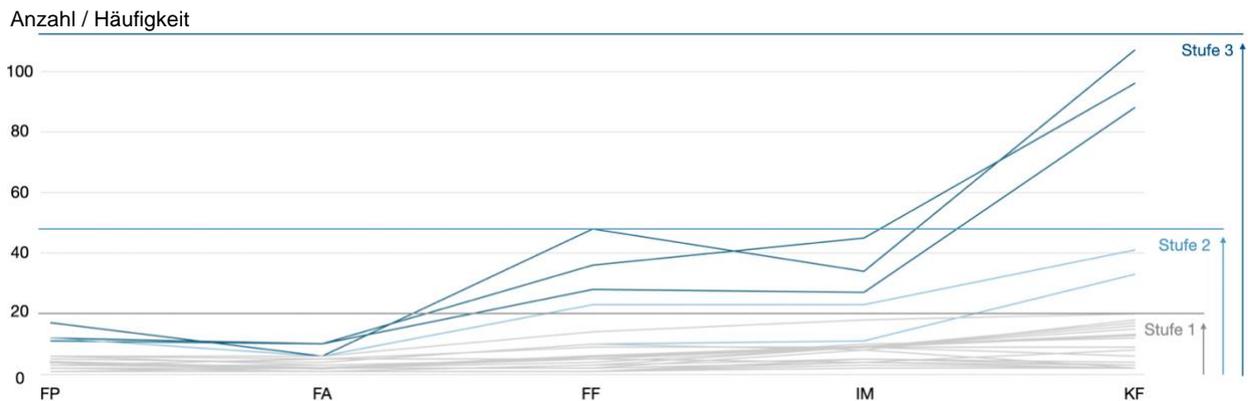
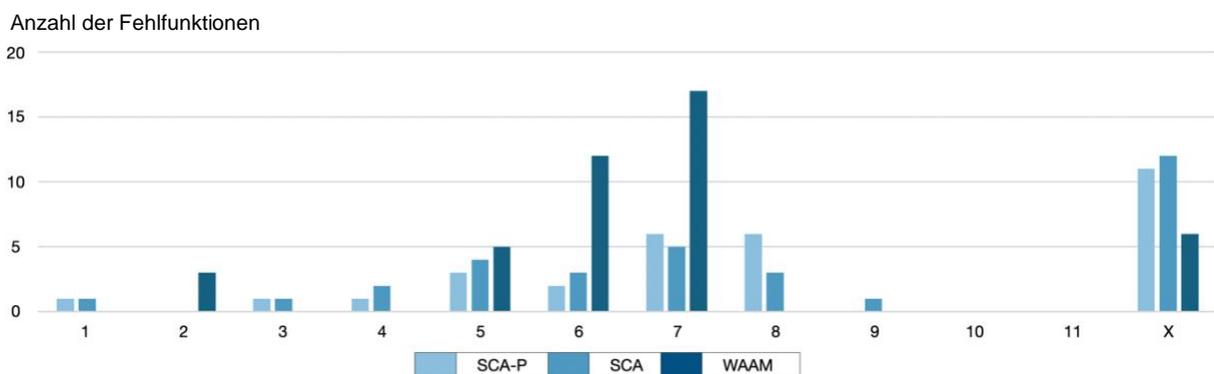


Abbildung 90: Zusammenfassung der Ergebnisse zu den Kategorien der Fehlerkataloge der Verfahren

Das bedeutet, dass die Informationsgenerierung und -nutzbarmachung zur Sicherung der operativen Handlungsfähigkeit durch die Vielzahl an Kontextfaktoren durchaus herausfordernder werden kann. Wird hierzu die Anzahl an auftretenden Arbeitssystemen in den Fehlfunktionen der Prozessauswirkung (Abbildung 91) betrachtet, kann diskutiert werden, wie häufig die jeweiligen Stufen im Prozess auftreten können. Es zeigt sich, dass Stufe 3 zu den Bauteil-Endkontrollen (X) der beiden SCA-Verfahren und die Ausführung des Druckvorgangs (7) in WAAM häufig vorkommt. Stufe 2 in der Vorbereitung des Baujobs (6) in WAAM ebenfalls häufig auftreten kann und die Stufe 2 innerhalb der Ausführung des Druckvorgangs (7) in SCA ein geringeres Vorkommen aufzeigt. Innerhalb der restlichen Verteilung in den Arbeitssystemen ist Stufe 1 der Regelfall.



1	3D-CAD-Datei erstellen	4	Materialmischung vorbereiten Grundplatte vorbereiten	7	Druckvorgang ausführen	10	Materialüberschuss nachbereiten
2	Material- /Prozessparameter festlegen, Druck- / Mischdaten festlegen, Bahnplanung erstellen	5	Anlage vorbereiten, WAAM-System vorbereiten	8	Bauteil nachbereiten	11	Anlage nachbereiten, WAAM-System nachbereiten
3	Ausgangsmaterial managen	6	Baujob vorbereiten	9	Bauteil nachbehandeln	X	Bauteil-Endkontrolle

Abbildung 91: Fehlerauftretende Arbeitssysteme zu den Fehlfunktionen in den Prozessauswirkungen

Der Blick in die Fehlerkataloge zeigte in den beiden SCA-Verfahren $n = 8$ und in WAAM $n = 7$ mögliche Kategorien zu den Informationsmärkten vorliegen (Abbildung 92). Dabei wurden in WAAM keine Regelwerke oder Normungen (3) genannt, wodurch sich dieser Unterschied von $n = 1$ begründet.

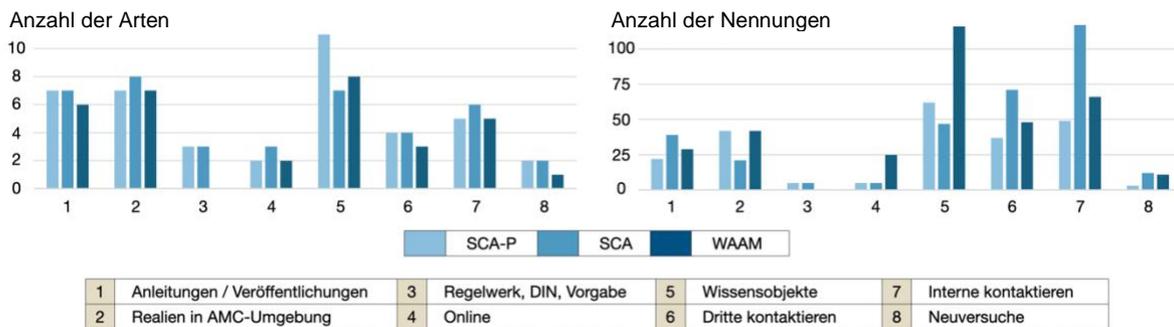


Abbildung 92: Kategorisierung der Informationsmärkte der Fertigungsverfahren mit Anzahl der Arten (links) und deren Nennungen (rechts)

Die Verteilung der Anzahl an Arten der Informationsmärkte in diesen Kategorien zeigt deutliche Ähnlichkeiten (linke Seite in Abbildung 92). Die detaillierten baujobspezifischen Dokumentationen in den Wissensobjekten (5) machen sich dabei insbesondere in SCA-P bemerkbar. Die Nennungen dieser Kategorien (rechte Seite in Abbildung 92) zeigen jedoch unterschiedliche Akzentuierungen. Beispielsweise wird in SCA-P und insbesondere in WAAM häufiger auf Wissensobjekte (5) zurückgegriffen und in SCA häufiger die interne Kommunikation (7) aufgesucht. Der Anteil an externer (6) und interner Kommunikation (7) nimmt einen hohen Gesamtanteil ein. Dies bestätigt u. a. die Prognosen der notwendiger werdenden überfachlichen Kompetenzen.

Zur Diskussion stehen die Einschätzungen der Experten zum Grad an potenziell enthaltener Wissensarbeit. Die diesbezüglichen Ergebnisse zeigen, dass die Kreuze zur Erstellung der Bahnplanung und die Ausführung des Druckvorgangs in den originären Bereich von Wissensarbeit der Vierfeldertafel gesetzt wurden. Zur Bahnplanung könnten die Anzahl an Fehlfunktionen und an Reflexionswissensaspekten und zum Druckvorgang die von dem Experten bei der Erhebung betonten auftretenden Fehlfunktionen in Verbindung gebracht werden und hierzu erweiterte Erklärungen liefern. Die SCA-Experten schätzten jedoch die Erstellung der 3D-CAD-Datei in den originären Bereich von Wissensarbeit ein, was im Kontrast zu den bisher gezeigten Ergebnissen steht, da sowohl die explizierten Tätigkeiten als auch die dokumentierten Fehlfunktionen keine diesbezüglichen Anzeichen oder Zusammenhänge liefern. Gleiches gilt in den SCA-Verfahren zur Einschätzung der Nachbereitung des Bauteils. Der langjährig erfahrene Experte (SCA-P) schätzte diese in den originären Bereich von Wissensarbeit ein, der weniger langjährig erfahrene Experte (SCA) hingegen in den Bereich ‚hohe Komplexität bei seltener Neuartigkeit‘ ein. Wenngleich hierzu ein geringer Anteil an auftretenden Fehlfunktionen der Prozessauswirkungen (siehe Abbildung 91) vorkommt, sind hierzu ebenfalls keine Anhaltspunkte eines Zusammenhangs vorhanden. Der alleinige Bezug von Wissensarbeit zu den Prozessauswirkungen scheint deutlich verkürzt und nicht aussagekräftig zu sein. Hierbei gilt es, weitere Faktoren zu identifizieren bzw. zur Betrachtung mit einzubeziehen, um diese Einschätzungen mit entsprechenden Daten zu hinterlegen.

5.4 Ausblick

Wie bereits eingeleitet, ergeben sich zum Thema Wissensarbeit offene Fragen, welche mit weiteren Analysen und gegebenenfalls Erhebungen verbunden sind. Die Daten des Ansatzes stellen hierfür einen umfangreichen Ausgangspunkt dar.

Eine interessante Perspektive ergibt sich, wenn nicht nur die Fehlfunktionen der Prozessauswirkungen in den Arbeitssystemen betrachtet werden, sondern auch die Einflüsse von Arbeitssystemen auf andere Arbeitssysteme – also die Verknüpfungen der Fehlfunktionen zur Fehlerart – analysiert werden. Am SCA-Verfahren erklärt bedeutet dies, dass eine zu nahe Anordnung der Bauteile im virtuellen Bauraum (Fehlerart – 3D-CAD-Datei erstellen) beim Entpacken des Bauteils entdeckt wird, weil die Bauteile miteinander verschmolzen sind (Fehlfunktion Prozessauswirkung – Bauteil nachbereiten). Das heißt, dass das Arbeitssystem ‚3D-CAD-Datei erstellen‘ einen Einfluss auf das Arbeitssystem ‚Bauteil nachbereiten‘ hat und damit deren Korrelationen ersichtlich werden. Dies kann in Form einer Matrix (Tabelle 48) ausgewertet werden, bei der ausgehend von den dokumentierten Arbeitssystemen der Prozessauswirkung – Fehlerauftreten (A) – die im Fehlernetz verbundenen Arbeitssysteme – Fehlerursprung / Einfluss (E) – aufgelistet werden.

Tabelle 48: Arbeitssystemeinfluss- und -auswirkungsmatrix zum SCA-Verfahren der Pilotierung

		Arbeitssysteme (Fehlerursprung)										A			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		11		
Arbeitssysteme (Fehlerauftreten)	1	3													3
	2														0
	3			1											1
	4			1											1
	5					2						3			5
	6					1					1				2
	7	1		1		3	1	3							9
	8	3					1		2						6
	9														0
	10														0
	11														0
X		1	5	2	6	1	8	11	1	1	2			38	
E		8	5	5	6	7	10	14	3	1	3	3			

Diese mögliche Korrelationsbetrachtung der Arbeitssysteme könnte eine weitere Möglichkeit sein, die Einschätzungen der Experten bezüglich des Grades an potenziell enthaltener Wissensarbeit in den Arbeitssystemen zu hinterlegen. Werden die Korrelationen aus Einflüssen und Auswirkungen addiert sowie mit einem Verhältnissfaktor von 0,75 multipliziert und der

numerischen Darstellung der Komplexität und Neuartigkeit gegenübergestellt (Abbildung 93) nähern sich die Daten deutlich an.

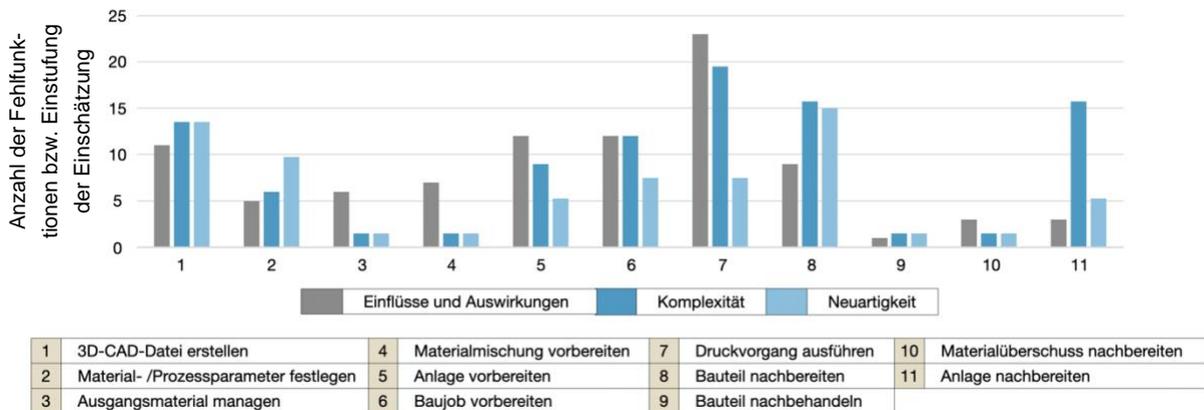


Abbildung 93: Arbeitssystemkorrelationen mit Einschätzung zum Grad an potenziell enthaltenen Wissensarbeit

Die Abweichungen im Managen des Ausgangsmaterials (3) und der Vorbereitung der Materialmischung (3) können mit einer gewissen Grundkomplexität verargumentiert werden, die von den Experten durch die geringe Neuartigkeit in diesem Kontext nicht mehr wahrgenommen wird, jedoch trotzdem vorhanden ist. Die Abweichung hinsichtlich der Nachbereitung des Bauteils (8) könnte dabei in Zusammenhang mit der hohen Neuartigkeit stehen, da hier einerseits die Individualität und andererseits die methodische Handhabung zum Entpacken und Säubern des Bauteils mitschwingen. Offen bleibt die Komplexität der Anlagennachbereitung (11).

Für die weiterführenden Arbeiten gilt es daher, das Themenfeld zur Wissensarbeit und, wie in der Konkretisierung der Forschungsfragen beschrieben, zu den überfachlichen Kompetenzanforderungen in den AMC-Umgebungen zu eruieren. Das Potenzial, welches die Arbeitssysteme mit sich bringen, erscheint von großer Bedeutung. Nicht nur zur Erschließung von fachlichen oder überfachlichen Kompetenzanforderungen, sondern auch für Analysen unterschiedlicher Disziplinen, wie der Standardisierung und Normung oder Ressourceneffizienz etc. Dies benötigt weitere Implikationen sowie die Anreicherung des Arbeitsablaufplans und des Arbeitssystems mit umfangreicheren Daten – beispielsweise Zeiten oder Materialflüsse und Mengeneingänge (Input) und -ausgänge (Output). Ferner würde dies zusätzlich die interdisziplinäre Zusammenarbeit unterstützen.

Der Ansatz kann geringfügig kompetenzbezogen weiterentwickelt werden, da die aktuellen Vermeidungs- und Entdeckungsmaßnahmen, wie regelmäßige oder stichprobenartige Prüfungen, Kontrollen und Wartungen, nur dann in der Kompetenzmatrix expliziert wurden, wenn diese tatsächlich in der Observierung durchgeführt wurden. Das bedeutet, man müsste diese Prozessschritte ebenfalls entsprechend begleiten, wenn diese umgesetzt werden – ausgenommen, diese werden von Dritten oder Externen durchgeführt. Aus den aktuellen Dokumentationen zu den Maßnahmen geht nicht hervor, wer diese Arbeiten wann durchführt.

Daher fehlen aktuell die Zuordnungsmöglichkeiten zu den Arbeitssystemen und infolgedessen auch, ob diese in die Kompetenzmatrix aufgenommen werden müssen oder nicht. Im Zuge dieser Weiterentwicklung können die auftretenden Arbeitssysteme in den Fehlfunktionen der Prozessauswirkung unmittelbar bei deren Erschließung mit dem Experten dokumentiert werden und würden eine Verlagerung dieser Erhebung von Phase IV in Phase II bedeuten. Dabei sollte weiter der Zusammenhang dieser mit den Entdeckungsmaßnahmen schlüssig berücksichtigt werden.

Mit den aktuellen Ergebnissen können außerdem Evaluationen hinsichtlich des aktuellen Forschungsstandes umgesetzt werden und deren Kongruenz zu verallgemeinerten Kompetenzbeschreibungen kann abgeglichen werden. Zudem können weiterführende Evaluationsstudien zum Ansatz das Feedback der Experten adressieren und deren Wahrnehmungen zur Zusammenarbeit und den Mehrwerten erschließen und abgreifen, inwiefern der Ansatz hilfreich für deren weitere Forschung ist. Das mündliche Feedback der Experten bei den Umsetzungen im Rahmen der Forschungsarbeit war dabei durchwegs positiv. Im Zuge der Analysen zu SCA mit A01 und WAAM zu A07 wurden bereits als Weiterführung der Forschungsarbeit die AMC-Verfahren des empirischen Entwicklungsfeldes des TRR277 zum Shotcrete (A04) und Powder Bed Fusion (A06) in den Phasen 0 und I umgesetzt. Das Shotcrete-Verfahren stellt sich hierbei mit insgesamt vier Bahnplanungen, einer externen Mischanlage, der Verwendung von Bewehrungsstahl sowie zwei Roboterarmen und deren Maschinenkommunikation deutlich komplex dar. Die bisherigen Analysen und Auswertungen zeigen, dass sowohl der Arbeitsablaufplan als auch der Arbeitssystembaum diesen erhöhten Anforderungen begegnen können. Absehbar werden hierzu die Fehler- und Kompetenzanalysen umgesetzt und die entsprechenden Instrumentarien eingesetzt. Die Umsetzung des Ansatzes mit der fünftägigen Prozessbeobachtung stellt sich dabei erheblich umfangreicher dar.

Der Ansatz in dessen Grundzügen und Instrumentarien erscheint zudem vor dem Hintergrund gleich aufgebauter, prozessbasierter Verfahren übertragbar zu sein. Für die Anwendung auf andere Fertigungen müsste lediglich eine Anpassung hinsichtlich der deduktiven Vorstrukturierung zum qualitätsgesicherten additiven Fertigungsprozess der DIN SPEC 17071 vorgenommen werden.

Die generierten Kompetenzprofile dieser Forschungsarbeit und auch die absehbar weiteren Kompetenzprofile können unmittelbar in Aus- und Weiterbildungs- bzw. Qualifizierungsprogramme eingebettet werden und für die fachlich-methodische Kompetenzentwicklung der Fachkräfte von morgen eingesetzt werden.

6 Literaturverzeichnis

- Abdullahi, A. Y.; Hamza, M. F.; & Isa, A. I. (2021). A Survey on the Contributions of 3D Printing to Robotics Education – A Decade Review. In: Ab. Nasir, A. F.; Ibrahim, A. N.; Ishak, I.; Mat Yahya, N.; Zakaria, M. A.; P. P. Abdul Majeed; A. (Hg.). *Recent Trends in Mechatronics Towards Industry 4.0. Lecture Notes in Electrical Engineering, Vol.730.* 289-302. Singapore: Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-33-4597-3_27
- AIAG & VDA (2019). *FMEA-Handbuch (deutsch).* Automotive Industry Action Group (Hg.) 1. Ausgabe. ISBN 13 978-1605343679.
- Arslan, A.; & Erdogan, I. (2021). Use of 3D Printers for Teacher Training and Sample Activities. *International Journal of Progressive Education.* Vol.17 (3). 343-360. <https://files.eric.ed.gov/fulltext/EJ1308475.pdf>
- Barykin, S.; Borovkov, A.; Rozhdestvenskiy, O.; Tarshin, A.; & Yadykin, V. (2020). Staff competence and training for digital industry. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* Vol.940 (1). Artikel 12106. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/940/1/012106/pdf>
- Benešová, A.; & Tupa, J. (2017). Requirements for Education and Qualification of People in Industry 4.0. *Procedia manufacturing.* Vol.11. 2195-2202. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.366>
- Bergmann, G. (2020). Industrie 4.0 – Konsequenzen für industrielle Arbeitsprozesse und Qualifizierung. In: Fischer, L. (Hg.). *Wirtschaftspsychologie, 2020-03.* Lengerich: Pabst. 43-58.
- Bertsche, B.; & Dazer, M. (2023). *Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau: Ermittlung von Bauteil- und System-Zuverlässigkeit.* 4. Auflage. Springer Vieweg
- Binner, H. F. (2011). *Handbuch der prozessorientierten Arbeitsorganisation: Methoden und Werkzeuge zur Umsetzung.* 4. Auflage. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG
- Bolpagni, M.; Ribeiro, D.; & Gavina, R. (2024). Guest editorial: Construction 4.0: methodologies, technologies and skills. *Construction innovation,* 2024-01. Vol.24 (1). 1-7. <https://doi.org/10.1108/CI-01-2024-349>
- Borowsky, C. (2024). *Wissenschaftliche Abstützung eines integrativen Forschungsansatzes zu Kompetenzanforderungen der Additiven Fertigung im Bauwesen.* Nicht veröffentlichte Master's Thesis an der Professur für Technikdidaktik. Technische Universität München.
- Bos, F.; Wolfs, R.; Ahmed, Z.; & Salet, T. (2016). Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing. In: Taylor & Francis (Hg.). *Virtual and Physical Prototyping,* 2016. Vol.11 (3), 209-225. <http://dx.doi.org/10.1080/17452759.2016.1209867>

- Brauckmann, O. (2019). *Digitale Revolution in der industriellen Fertigung – Denkansätze*. Springer Vieweg. ISBN 978-662-58036-3
- Chacon, R. (2021). Designing construction 4.0 activities for aec classrooms. *Basel: Buildings*, 2021-11. Vol.11 (11). Artikel 511. <https://doi.org/10.3390/buildings111110511>
- Chandrashekar, A. C.; Nagar, S. V.; & Guruprasad, K. (2020). A Skill Enhancement Virtual Training Model for Additive Manufacturing Technologies. In: Auer, M. E.; Kalyan Ram, B. (Hg.). *Cyber-Physical Systems and Digital Twins. REV2019 2019. Lecture Notes in Networks and Systems*. Vol.80. 532-543. Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-23162-0_48
- Chen, Z. (2021). Exploration on reform of materials forming and control engineering for intelligent and additive manufacturing. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021. IOP Publishing. Vol.693 (1). Artikel 12020. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/693/1/012020/pdf>
- Choo, S.; Park, S.; & Nelson, N. J. (2021). Evaluating Spatial Thinking Ability Using Item Response Theory: Differential Item Functioning across Math Learning Disabilities and Geometry Instructions. *Sage Journals – Learning Disability Quarterly*. Vol.44 (2). 68-81 <https://doi.org/10.1177/0731948720912417>
- Cleveland, H. (1989). *The Knowledge Executive. Leadership in an Information Society*. New York: EP Dutton
- Cobo Cards Pool. (2010). Welche Informationen enthält ein Arbeitsplan? Erstellen sie ein Beispiel für einen Arbeitsplan. Karte von matze001 der FH Aachen. <https://www.cobocards.com/pool/de/card/87137081/online-karteikarten-welche-informationen-enthaelt-ein-arbeitsplan-erstellen-sie-ein-beispiel-fuer-einen-arbeits-/> (Zugriff am: 05.04.2023)
- Colorado, H. A.; Mendoza, D. E.; & Valencia, F. L. (2021). A Combined Strategy of Additive Manufacturing to Support Multidisciplinary Education in Arts, Biology, and Engineering. *Journal of Science Education and Technology*. Vol.30. 58-73. <https://doi.org/10.1007/s10956-020-09873-1>
- Despeisse, M., & Minshall, T. (2017). Skills and education for additive manufacturing: a review of emerging issues. In: Lödding, H., Riedel, R., Thoben, KD., v. Cieminski, G., Kiritsis, D. (Hg.). *Advances in Production Management Systems. The Path to Intelligent, Collaborative and Sustainable Manufacturing. APMS 2017. IFIP Advances in Information and Communication Technology*, Vol.513. 289-297. Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-66923-6_34
- DFG. (2020). Detailseite zum Projekt TRR 277: Additive Fertigung im Bauwesen – Die Herausforderung des großen Maßstabs. <https://gepris.dfg.de/gepris/projekt/414265976> (Zugriff am: 25.07.2022)

- Dilling, F.; & Vogler, A. (2021). Fostering Spatial Ability through Computer-Aided Design: A Case Study. In: Baccaglioni-Frank, A. (Hg.). Digital Experiences in Mathematics Education. Vol.7. 323–336. Cham: Springer. <https://doi.org/10.1007/s40751-021-00084-w>
- DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2016). DIN EN ISO 6385:2016-12. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2018). DIN EN ISO 65124:2018-10. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2020). DIN EN ISO/ASTM 52904:2020-10. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2019). DIN SPEC 17071:2019-12. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- Erpenbeck, J., & v. Rosenstiel, L. (2007). Handbuch Kompetenzmessung: Erkennen, verstehen und bewerten von Kompetenzen in der betrieblichen, pädagogischen und psychologischen Praxis. 2. Auflage. Stuttgart: Schäffer-Poeschel.
- Espera, A. H. (2019). Exploring Challenges in the Design of Learning Environments Towards Technical Competency Development in Additive Manufacturing. 2019 IEEE Frontiers in Education Conference (FIE). IEEE. Artikel 9028586. <https://doi.org/10.1109/FIE43999.2019.9028586>
- Eversheim, W. (1995). Arbeitsplanerstellung. In: Heinz M. Hiersig (Hg.). Lexikon Produktionstechnik / Verfahrenstechnik. Band 2. Berlin, Heidelberg: Springer
- Eversheim, W. (1989). Organisation in der Produktionstechnik. Band 3: Arbeitsvorbereitung. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer
- Frithioff, A.; Frendø, M.; Pedersen, D. B.; Sørensen, M. S.; & Wuyts Andersen, S. A. (2021). 3D-Printed Models for Temporal Bone Surgical Training: A Systematic Review. Otolaryngology – Head and Neck Surgery. Vol. 165 (5). 617-625. <https://doi.org/10.1177/0194599821993384>
- Gabler, T. (1988). Gablers Wirtschafts-Lexikon. Band 1. 12. Auflage. Wiesbaden: Springer Fachmedien. ISBN 3-409-30383-9
- Gallego, J.; Rodríguez-Alloza, A. M.; & Saiz-Rodríguez, L. (2020). Evaluation of warm rubberized stone mastic asphalt mixtures through the Marshall and gyratory compactors. Materials 2020-01. Vol.13 (2). Artikel 265. <https://doi.org/10.3390/ma13020265>
- Geerts, F.; & Renda, V. (2019). The Machine Tool Industry's Changing Skills Needs: What is the Impact of Additive Manufacturing Technologies?. In: Pei, E.; Monzón, M.; Bernard, A. (Hg.) Additive Manufacturing – Developments in Training and Education. Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-76084-1_9

- Gharleghi, R.; Dessalles, C. A.; & Lal, R. (2021). 3D Printing for Cardiovascular Applications: From End-to-End Processes to Emerging Developments. *Annals of biomedical engineering*. Vol.49 (7). 1598-1618. <https://doi.org/10.1007/s10439-021-02784-1>
- Gibbons, D. W.; Serfontein, J. L.; & v. d. Merwe, A. F. (2021). Mapping the path to certification of metal laser powder bed fusion for aerospace applications. *Rapid prototyping journal*. Vol.27 (2). 355-361. <https://doi.org/10.1108/RPJ-07-2020-0154>
- Gomez, P.; & Probst, G. (1999). *Die Praxis des ganzheitlichen Problemlösens: Vernetzt denken – Unternehmerisch handeln – Persönlich überzeugen*. Bern, Stuttgart, Wien: Verlag Paul Haupt.
- Guarino, S.; Marchese, E.; & Ponticelli, G. S. (2021). Additive manufacturing for neurosurgery: Digital light processing of individualized patient-specific cerebral aneurysms. *Materials* 2021-10, Vol.14 (20). Artikel 6057. <https://doi.org/10.3390/ma14206057>
- Henke, K. (2016). *Additive Baufertigung durch Extrusion von Holzleichtbeton*. Dissertation an der Technischen Universität München. <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1307185/1307185.pdf>
- Henke, K.; Talke, D.; & Winter, S. (2016). Abschlussbericht für das Forschungsvorhaben: Additive Fertigung frei geformter Bauelemente durch numerisch gesteuerte Extrusion von Holzleichtbeton. <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1355421/document.pdf>
- Hermann, S. (2002). Herausforderung Wissensarbeit. Ist die Personalwirtschaft darauf vorbereitet? In: *Personal* 2002, Vol.54 (8), S. 10-14. <https://publica.fraunhofer.de/entities/publication/c4ebdb5e-6454-423b-aca9-3aeafb2f5f20/fullmeta>
- Hernandez-de-Menendez, M.; Morales-Menendez, R.; & Escobar, C. A. (2020). Competencies for Industry 4.0. *International journal on interactive design and manufacturing*. Vol.14 (4). 1511-1524. <https://doi.org/10.1007/s12008-020-00716-2>
- Hube, G. (2005). *Beitrag zur Beschreibung und Analyse von Wissensarbeit*. Dissertation an der Universität Stuttgart. IPA-IAO Forschung und Praxis, 422. https://elib.uni-stuttgart.de/bitstream/11682/4067/1/Diss_Hube_Wissensarbeit.pdf
- Hwang, D.; Blake Perez, K.; & Anderson, D. (2021). Design Principles for Additive Manufacturing: Leveraging Crowdsourced Design Repositories. *Journal of mechanical design*. Vol.143 (7), Artikel 72005. <https://doi.org/10.1115/1.4050873>
- Kamara, S.; & Faggiani, K. S. (2021). Introduction: Moving into Additive Manufacturing. United States: John Wiley & Sons. *Fundamentals of Additive Manufacturing for the Practitioner*. 1-20. <https://doi.org/10.1002/9781119750529.ch1>
- Kim, S.; Shin, Y.; Park, J.; Lee, S.; & An, K. (2021). Exploring the potential of 3d printing technology in landscape design process. *Land*, 2021-03, Vol.10 (3), Artikel 259. 1-14. Basel: MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/land10030259>

- Kirchheim, A.; Dennig, H.; & Zumofen, L. (2018). Why Education and Training in the Field of Additive Manufacturing is a Necessity. In: Meboldt, M., Klahn, C. (Hg.). *Industrializing Additive Manufacturing - Proceedings of Additive Manufacturing in Products and Applications - AMPA2017*. AMPA 2017. 329-336. Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-66866-6_31
- Kloft, H.; Gehlen, C.; Dörfler, K.; Hack, N.; Henke, K.; Lowke, D.; Mainka, J.; & Raatz, A. (2021). TRR 277: Additive Fertigung im Bauwesen. *Bautechnik* 98, Heft 3. 222-230. Berlin: Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG. <https://doi.org/10.1002/bate.202000113>
- Kloft, H.; Hack, N.; Mainka, J.; Brohmann, L.; Herrmann, E.; Ledderose, L.; & Lowke D. (2019). Additive Fertigung im Bauwesen: erste 3-D-gedruckte und bewehrte Betonbauteile im Shotcrete-3-D-Printing- Verfahren (SC3DP). *Bautechnik* 96, Heft 12. 929-938. Berlin: Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG. <https://doi.org/10.1002/bate.201900094>
- Knochel, A. D.; & Meeken, L. (2021). Uncertain Matters: Material to Form Curricula for Digital Design and Fabrication. *European Journal of STEM Education*. Vol.6 (1). Artikel 19. <http://dx.doi.org/10.20897/ejsteme/11530>
- Kuhlen, R., Lewandowski, D., Semar, W., & Womser-Hacker, C. (2023). *Grundlagen der Informationswissenschaft*. 7. Ausgabe. Berlin: De Gruyter. ISBN 13 978-3110768954.
- Kuhlen, R., & Semar, W. (2023). Teil A 1: Information – ein Konstrukt mit Folgen. In: Kuhlen, R., Lewandowski, D., Semar, W., Womser-Hacker, C. (Hg.). *Grundlagen der Informationswissenschaft*. Grundlagen der Informationswissenschaft. 7. Ausgabe. Berlin: De Gruyter. ISBN 13 978-3110768954.
- Lensing, K., & Friedhoff, J. (2018). Designing a curriculum for the Internet-of-Things-Laboratory to foster creativity and a maker mindset within varying target groups. *Elsevier B.V. Procedia Manufacturing*. Vol.23. 231-236. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.04.022>
- Levin, L.; & Verner, I. M. (2021). Student Practice In 3D Design and Printing for Promoting Analytical and Applied Mathematical Thinking Skills. *International Journal of Engineering Pedagogy*. Vol.11 (3). 39-53. <https://doi.org/10.3991/ijep.v11i3.19893>
- Lindemann, H.; Gerbers, R.; Ibrahim, S.; Dietrich, F.; Herrmann, E.; Dröder, K.; Raatz, A.; & Kloft, H. (2018). Development of a Shotcrete 3D-Printing (SC3DP) Technology for Additive Manufacturing of Reinforced Freeform Concrete Structures. In: Wangler, T., Flatt, R. (Hg.) *First RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication – Digital Concrete 2018*. DC 2018. RILEM Bookseries, Vol.19. 287-298. Cham Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-99519-9_27

- Lowke, D.; Dini, E.; Perrot, A.; Weger, D.; Gehlen, C.; & Dillenburger, B. (2018). Particle-bed 3D printing in concrete construction – Possibilities and challenges. In: Flatt, R. (Hg.). *Cement and Concrete Research*. 50-65. www.elsevier.com/locate/cemconres
- Marschall H. (2016). *Personal für die additive Fertigung. Kompetenzen, Berufe, Aus- und Weiterbildung*. Wiesbaden: Springer Vieweg. ISSN 2197-6708. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-658-13307-8>
- Marschall, H. (2020). *Additive Fertigung und betriebliche Qualifizierung. Beschäftigungs- und Qualifizierungschancen von Geringqualifizierten im 3D-Druck/in der additiven Fertigung. Working Paper Forschungsförderung Nr. 172*. Düsseldorf: Hans-Böckler-Stiftung. https://www.boeckler.de/fpdf/HBS-007609/p_fofoe_WP_172_2020.pdf
- Marty, M., Broutin, A., Vergnes, J., & Vaysse, F. (2019). Comparison of student's perceptions between 3D printed models versus series models in paediatric dentistry hands-on session. *European journal of dental education*. Vol.23 (1), 68-72. <https://doi.org/10.1111/eje.12404>
- Mayring, P. (2002). *Einführung in die qualitative Sozialforschung. Eine Anleitung zu qualitativem Denken*. 5. Aufl. Weinheim Basel: Beltz Verlag. ISBN 978-3-407-29093-9
- Mayring, P. (2010). *Qualitative Inhaltsanalyse – Grundlagen und Techniken*. Weinheim Basel: Beltz Verlag. ISBN 978-3-407-25730-7
- Mayring, P. (2016). *Einführung in die qualitative Sozialforschung*. 6. überarbeitete Auflage Weinheim und Basel: Beltz Verlag.
- Daniel, C., Schmitt, B., & Petersen, M. (2018). Work-Process Orientated and Competence Based Professional Training for Skilled Workers in Laser Additive Manufacturing. In: Meboldt, M., Klahn, C. (Hg). *Industrializing Additive Manufacturing - Proceedings of Additive Manufacturing in Products and Applications - AMPA2017*. AMPA 2017. 319-328. Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-66866-6_30
- Mechtcherine, V.; & Nerella, V. N. (2018). 3-D-Druck mit Beton: Sachstand, Entwicklungstendenzen, Herausforderungen. *Bautechnik* 95, Heft 4. 275-287. Berlin: Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG. <https://doi.org/10.1002/bate.201800001>
- Meeken, L. (2020). Forms and Bodies: Using Digital Fabrication to Interface the Virtual and Corporeal. *Art Education*. Vol. 73 (5). 47-54. <https://doi.org/10.1080/00043125.2020.1766924>
- Melo, G.; Kies, A.; Paluch, S.; & Schleifenbaum, J. H. (2023). Competencies to Address the Industrial Additive Manufacturing Towards Sustainable Production. In: Kohl, H., Seliger, G., Dietrich, F. (Hg.). *Manufacturing Driving Circular Economy. GCSM 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 320-327. Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-28839-5_36

- Motyl, B.; & Filippi, S. (2021). Trends in engineering education for additive manufacturing in the industry 4.0 era: a systematic literature review. *International journal on interactive design and manufacturing*. Vol.15 (1). 103-106. <https://doi.org/10.1007/s12008-020-00733-1>
- Noël, G. P. J. C.; Ding, W.; & Steinmetz, P. (2021). 3D Printed Heart Models Illustrating Myocardial Perfusion Territories to Augment Echocardiography and Electrocardiography Interpretation. *Medical science educator*, 2021-04. Vol.31 (2). 439-446. <https://doi.org/10.1007/s40670-020-01177-8>
- North, K. (1999). *Wissensorientierte Unternehmensführung. Wertschöpfung durch Wissen*. Wiesbaden: Gabler-Verlag.
- Novak, E.; Brannon, M.; & Librea-Carden, M. R. (2021). A systematic review of empirical research on learning with 3D printing technology. *Journal of computer assisted learning*, 2021-10. Vol.37 (5). 1455-1478. ISSN-0266-4909
- Novak, E.; & Wisdom, S. L. (2018). 3-D Printing Technology Projects in a Science Methods Course: Enhancing Prospective Teachers' Science Teaching Confidence. New York City: Annual Meeting of the American Educational Research Association. AERA Online Paper Repository.
- Ohrenstein, D. (2019). 3 Actions Congress Can Take Now to Help Small Manufacturers. *Industry Week*. <https://www.industryweek.com/the-economy/article/22028221/3-actions-congress-can-take-now-to-help-small-manufacturers>
- Pei, E.; Bernard, A.; Gu, D.; Klahn, C.; Monzón, M.; Petersen, M.; & Sun, T. (2023). *Springer Handbook of Additive Manufacturing*. Cham: Springer Nature. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-031-20752-5>
- Pei, E.; Monzón, M.; & Bernard, A. (2019). *Additive Manufacturing – Developments in Training and Education*. Cham: Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-76084-1>
- Petersen, M.; & Leupold, C. (2023). VET and Academic Training for Additive Manufacturing in Germany. In: *Springer Handbook of Additive Manufacturing*. Pei, E.; Bernard, A.; Gu, D.; Klahn, C.; Monzón, M.; Petersen, M.; Sun, T. (Hg.). Cham: Springer Nature. 867-879. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-031-20752-5>
- Pfiffner, M.; & Stadelmann, P. D. (1995). *Arbeit und Management in der Wissensgesellschaft. Konzeptualisierung, Problemanalyse und Lösungsansätze für das Management von Wissensarbeit*. Dissertation an der Universität St. Gallen. Bamberg: Difo Druck GmbH.
- Pikkarainen, A.; & Piili, H. (2020). Implementing 3D Printing Education Through Technical Pedagogy and Curriculum Development. *International Journal of Engineering Pedagogy (iJEP)*. Vol.10 (6). 95-119. <https://doi.org/10.3991/ijep.v10i6.14859>

- Pittich, D. (2008). Erprobung einer prozessbezogenen Diagnostik von Lernstrategien bei Berufsschülern (unveröffentlicht).
- Pittich, D. (2013). Diagnostik fachlich-methodischer Kompetenzen. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.
- Pittich, D. (2023). TRIX – Handreichung: Orientierungskonzepte und Tools für kompetenz-, handlungsorientiertes und digital-angereichertes Lernen im beruflichen Lernfeldunterricht. <https://doi.org/10.14459/2023md1709213>
- Pittich, D.; Gromer, A.; & Sing, R. (2023). Konkretisierung überfachlicher Kompetenzen als Lernziele eines Lernfeldunterrichts – Ein aktueller Schwerpunkt berufsdidaktischer Forschung. In: Barabasch A, & Fischer S. (Hg.). Die Förderung von transversalen Kompetenzen in der Berufsbildung. bwp@ Spezial 20. 2023-11. 1-23. https://www.bwpat.de/spezial20/pittich_etal_spezial20.pdf
- Pittich, D.; & Ludwig, T. (2022). Competence development in a student-centered learning environment. 2022 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON). 1208-1212. <https://doi.org/10.1109/EDUCON52537.2022.9766790>
- Pittich, D.; Tenberg, R.; & Lensing, K. (2019). Technikdidaktische Herausforderungen im Übergang zu Industrie 4.0. Die vierte industrielle Revolution und ihre Herausforderungen für die Hochschuldidaktik. Bielefeld: wbv. 167-182.
- Popescu, D.; Popa, D. M.; & Cotet, B. G. (2019). Getting ready for Generation Z students - considerations on 3D printing curriculum. Propósitos y Representaciones. Vol.7 (2). 240-268. <http://dx.doi.org/10.20511/pyr2019.v7n2.280>
- Probst, G.; Raub, S.; & Romhardt, K. (1999). Wissen managen. Wie Unternehmen ihre wertvollste Ressource optimal nutzen. Wiesbaden: Gabler Verlag.
- Rapp, A. O.; Sudhoff, B.; & Pittich, D. (2011). Schäden an Holzfußböden. 2. Auflage. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.
- Rauner, F. (2010). Qualifikation, Kompetenz und berufliches Wissen – ein aufklärungsbedürftiger Zusammenhang. In: Berufsbildungsforschung - Alte und neue Fragen eines Forschungsfeldes. Dér, K.; Schlögl, P. (Hg.). Bielefeld: transcript-Verlag. 86-102.
- Rausch, A. (2012). Prozessnahe und retrospektive Erhebungsmethoden der Arbeitsanalyse in der betrieblichen Ausbildung. In: Rausch, A.; Kögler K.; & Laireiter A. (Hg.). Tagebücher als prozessnahe Erhebungsinstrumente in der Feldforschung. Themenheft der Empirischen Pädagogik Landau: VEP. 247-270. https://www.researchgate.net/publication/283212487_Prozessnahe_und_retrospektive_Erhebungsmethoden_der_Arbeitsanalyse_in_der_betrieblichen_Ausbildung

- REFA (1984). Methodenlehre des Arbeitsstudiums: Teil 1 Grundlagen. 7. Aufl. Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e. V. (Hg.). München: Hanser. ISBN 3-446-14234-7.
- REFA (1992). Methodenlehre des Arbeitsstudiums: Teil 2 Datenermittlung. 7. Aufl. Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e. V. (Hg.). München: Hanser. ISBN 3-446-14235-5.
- Rehäuser, J.; & Krcmar, H. (1996). Wissensmanagement im Unternehmen. In: Schreyögg, G.; Conrad, P. (Hg.). Managementforschung 6 – Wissensmanagement. Berlin: de Gruyter. 1-40.
- Renkl, A. (1994). Träges Wissen: Die „unerklärliche“ Kluft zwischen Wissen und Handeln. Forschungsbericht Nr. 41. LMU München, Lehrstuhl für Empirische Pädagogik und Pädagogische Psychologie. ISSN 1614-6336.
- Renkl, A. (1996). Träges Wissen: Wenn Erlerntes nicht genutzt wird. Psychologische Rundschau, 47. 78-92.
- Resch, M. (1988). Die Handlungsregulation geistiger Arbeit. Bestimmung und Analyse geistiger Arbeitstätigkeiten in der industriellen Produktion. Bern, Stuttgart: Hans Huber Verlag.
- Reymus, M.; Liebermann, A.; Diegritz, C. (2021). Development and evaluation of an interdisciplinary teaching model via 3D printing. Clinical and experimental dental research, 2021-02. Vol.7 (1). 3-10. <https://doi.org/10.1002%2Fcre2.334>
- Salmi, M. (2021). Modeling, simulation and data processing for additive manufacturing. Materials 2021-12. Vol.14 (24). Artikel 7755. Basel: MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/ma14247755>
- Schüpbach, H.; & Zölch, M. (2004). Analyse und Bewertung von Arbeitstätigkeiten und Arbeitssystemen. In: Schuler, H. (Hg.). Lehrbuch Organisationspsychologie. 3. Auflage. Bern: Huber. 197 – 220
- SFB Transregio TRR 277. Projekthomepage: <https://www.tu-braunschweig.de/trr277> (Zugriff am: 25.07.2022)
- Sing, R. (2022). Konkretisierung überfachlicher Kompetenzen für berufliches Lernen am Beispiel EfEG. Nicht veröffentlichte Master's Thesis an der Professur für Technikdidaktik. Technische Universität München.
- Stavropoulos, P.; Lianos, A. K.; Bikas, H.; & Mourtzis, D. (2020). Skills Requirements for the 4th Industrial Revolution: The Additive Manufacturing case. MATEC Web of Conferences, 2020. Les Ulis: EDP Sciences. Vol.318. <https://doi.org/10.1051/matecconf/202031801021>
- Strohm, O.; & Ulich, E. (1999). Ganzheitliche Betriebsanalyse unter Berücksichtigung von Mensch, Technik, Organisation (MTO-Analyse). In H. Dunkel (Hrsg.), Handbuch psychologischer Arbeitsanalyseverfahren. Zürich: vdf.
- Suters, L. (2021). Elementary Preservice Teacher Coursework Design for Developing Science and Mathematics Computational Thinking Practices. Contemporary Issues in Technology and Teacher Education (CITE Journal). Vol. 21 (2). <http://dx.doi.org/10.33902/JPR.202318599>

- Tenberg, R.; Bach, A.; & Pittich, D. (2019). Didaktik technischer Berufe. Band 1 - Theorie & Grundlagen. Franz Steiner Verlag. Stuttgart: Franz Steiner Verlag.
- Tenberg, R.; Bach, A.; & Pittich, D. (2020). Didaktik technischer Berufe. Band 2 - Praxis & Reflexion. Franz Steiner Verlag. Stuttgart: Franz Steiner Verlag.
- Tenberg, R.; & Pittich, D. (2017). Ausbildung 4.0 oder nur 1.2? Analyse eines technisch betrieblichen Wandels und dessen Implikationen für die technische Berufsausbildung. *Journal of Technical Education (JOTED)*. Jg. 5 (Heft 1). S. 27-46. <https://doi.org/10.48513/joted.v5i1.94>
- Tihinen, M.; Pikkarainen, A.; & Joutsenvaara, J. (2021). Digital Manufacturing Challenges Education – SmartLab Concept as a Concrete Example in Tackling These Challenges. *Future internet*, 2021. Vol.13 (8). Basel: MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/fi13080192>
- TUM (2023). Eine neue Ära für nachhaltiges Bauen: Forschungsverbund zum 3D-Druck im Bauwesen geht in zweite Förderphase. TUM School of Engineering and Design. <https://www.ed.tum.de/ed/news-single-view-start/article/eine-neue-aera-fuer-nachhaltiges-bauen-research-network-on-3d-printing-in-construction-enters-second-funding-phase/>
- Ulich, E. (2011). *Arbeitspsychologie*. 7. überarbeitete Auflage. Zürich: vdf Hochschulverlag / Stuttgart: Schäffer-Poeschel Verlag für Wirtschaft. ISBN 978-3-7281-4042-5.
- Ulich, E. (2013). Arbeitssysteme als Soziotechnische Systeme – eine Erinnerung. *Journal Psychologie des Alltagshandelns*. <https://diglib.uibk.ac.at/download/pdf/2498905.pdf>
- Weger, D.; Lowke, D.; & Gehlen, C. (2016). 3D printing of concrete structures using the selective binding method – Effect of concrete technology on contour precision and compressive strength. Conference paper. 11th fib International PhD Symposium in Civil Engineering. 403-410. <https://www.researchgate.net/publication/321491235>
- Weidt, S. (2003). *Intraorganisationales Kompetenzmanagement für die Logistikplanung*. Dissertation an der Universität Dortmund. <https://eldorado.tu-dortmund.de/bitstream/2003/2807/1/weidtunt.pdf>
- Werdich, M. (2012). *FMEA – Einführung und Moderation*. 2. überarbeitete und verbesserte Auflage. Wiesbaden: Springer Fachmedien; Vieweg+Teubner. ISBN 978-3-8348-2217-8.
- Wersig, G. (1971). *Information, Kommunikation, Dokumentation: ein Beitrag zur Orientierung der Informations- und Dokumentationswissenschaft*. München: Verlag Dokumentation
- Zafer, Y. E.; Goel, S.; & Ganvir, A. (2020). Encapsulation of electron beam melting produced alloy 718 to reduce surface connected defects by hot isostatic pressing. *Materials*, 2020-03. Vol.13 (5). Artikel 1226. 1-12. Basel: MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/ma13051226>
- Zeyn, H. (2017). *Industrialisierung der Additiven Fertigung: Digitalisierte Prozesskette - von der Entwicklung bis zum einsetzbaren Artikel - Industrie 4.0*. 1. Auflage. DIN Deutsches Institut für Normung e.V (Hg.). Berlin Wien Zürich: Beuth Verlag GmbH. ISBN 978-3-4102-6919-9

Zollner, A. (vsl. 2025). Wahrnehmungen von Lehrkräften zum Umsetzungsstand überfachlicher Kompetenzen im beruflich-technischen Unterricht: Ergebnis einer Explorationsstudie. Dissertation an der Technischen Universität München. Dissertation an der Technischen Universität München.

7 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Bilanzierung 1 zu Additiver Fertigung im Bauwesen	8
Abbildung 2:	Bilanzierung 2 zu Additiver Fertigung	10
Abbildung 3:	Modell zur Identifikation von Kompetenzerfordernissen (vgl. Abbildung 1 (a) in (Lensing & Friedhoff, 2018, S. 233)).....	11
Abbildung 4:	Humane Ressourcen und Kompetenzen (vgl. Abbildung 14 in Tenberg et al., 2019, S. 94).....	14
Abbildung 5:	Darstellungen der Subjekt-Objekt- oder Subjekt-Subjekt-Beziehungen, aus denen sich die Selbstorganisationsdispositionen ableiten lassen (vgl. Abbildung 15 in Ternberg et al., 2019, S. 96 sowie Erpenbeck & Rosenstiel, 2007, S. XXI ff.).....	15
Abbildung 6:	Aktivitäts- und umsetzungsorientierte Kompetenzen als ‚fallspezifische Integration‘ unterschiedlicher Kompetenzdimensionen (vgl. Abbildung 25 in Tenberg et al., 2019, S. 129)	17
Abbildung 7:	Angepasstes Arbeitsmodell fachlich-methodischer Kompetenzen (vgl. Pittich, 2013 sowie Abbildung 22 in Tenberg et al., 2019, S. 109)	18
Abbildung 8:	Unterscheidung von geistiger Arbeit und körperlicher Arbeit und jeweiligem Anteil an Kopfarbeit und Handarbeit (vgl. Bild 3.3 in Hube, 2005, S. 32 sowie in Anlehnung an Resch, 1988, S. 17).....	22
Abbildung 9:	Vierfeldertafel zur Beschreibung verschiedener Arten von Wissensarbeit (vgl. Bild 4.7 in Hube, 2005, S. 64)	24
Abbildung 10:	Zeichen, Daten, Informationen und Wissen in einer hierarchischen Darstellung (vgl. Rehäuser & Krcmar, 1996, S. 3).....	26
Abbildung 11:	Kontinuum zwischen den Polen Daten und Wissen (vgl. Probst et al., 1999, S. 38).....	26
Abbildung 12:	Von den Wissensobjekten zur handlungsrelevanten Information (vgl. Abbildung 1 in Kuhlen & Semar, 2023, S. 12)	27
Abbildung 13:	Struktur der Analyseebenen (vgl. Abbildung 27 in Pittich, 2013, S. 100)	32
Abbildung 14:	Herstellung eines Produktes mit additiver Fertigung (in Anlehnung an Abbildung 1 in Weger et al., 2016, S. 403)	34
Abbildung 15:	Fertigungsmethoden und -verfahren im Bauwesen	35
Abbildung 16:	Schritte 1 und 2 zum Druckprozess des Partikelbettverfahrens	35
Abbildung 17:	Methoden des Partikelbettverfahrens.....	36
Abbildung 18:	Schematische Darstellung des Systemaufbaus vom Ablageverfahren (in Anlehnung an Henke et. al., 2016, S. 14).....	37
Abbildung 19:	Qualitätsgesicherter Fertigungsprozess mit relevanten Bereichen (vgl. Bild 1 in DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2019, S. 7)	38
Abbildung 20:	Sieben Schritte zur FMEA nach AIAG & VDA 2019.....	41
Abbildung 21:	System-/Strukturbaum mit Systemelementen unterschiedlicher Ebenen (vgl. Abbildung 3.2-2 in AIAG & VDA, 2019, S. 87)	42

Abbildung 22:	Schematische Darstellung eines Funktionsnetzes mit Fokuselement in Systemelementebene 1.2 (vgl. Abbildung 3.2-2 in AIAG & VDA, 2019, S. 93).	43
Abbildung 23:	Schematische Darstellung eines Fehlfunktionsnetzes mit Fokuselement in Systemelementebene 1.2 sowie mit Darstellung der Fehlerfolgenkette (vgl. Abbildung 2.4-3 und 3.4-2 in AIAG & VDA, 2019, S. 52 und S. 101)	43
Abbildung 24:	Zehnerregel der Fehlerkosten mit Fehlerverursachung im Produktlebenslauf (vgl. Abbildung 1.2 in Werdich, 2012, S. 4)	46
Abbildung 25:	Verortung der FMEA-Arten nach Zielvorgaben und Lösungsvorschlag im Produktlebenslauf	47
Abbildung 26:	Exemplarisches Netzdiagramm zur Bewertung von Arbeitssystemen (vgl. Ulich, 2011, S. 91)	51
Abbildung 27:	Schematische Darstellung der zentralen Modellierungsmethoden Funktions- und Prozessorientierung (vgl. Abbildung 1-16 in Binner, 2011, S. 29)	59
Abbildung 28:	Konkretisierung der Forschungsstränge und Fokussierung der Zielstellung zur Forschungsarbeit	63
Abbildung 29:	Theorie-integratives Arbeitsmodell zur Strukturierung und Systematisierung der AMC-Prozesse	65
Abbildung 30:	Logik zum Arbeitsablauf innerhalb der Arbeitssystemebenen	70
Abbildung 31:	Erweitertes Arbeitsmodell 1 für die Erschließung der Informationsgenerierung und -nutzbarmachung (zur Sicherung der operativen Handlungsfähigkeit)	71
Abbildung 32:	Adaptiertes Modell nach Kuhlen & Semar (2023) zur Informationsverarbeitung	72
Abbildung 33:	Fünf Phasen des methodischen Vorgehens mit Bezug zu den Forschungsfragen	74
Abbildung 34:	Struktur und Inhalte der Präsentation zum AMC-Verfahren entlang der Guideline	75
Abbildung 35:	Systematische Vorbereitung und Überführung der Daten in die FMEA-Software	80
Abbildung 36:	Analyse AMC-relevanter Kompetenzen	82
Abbildung 37:	Exemplarisches Fehlernetz mit Fokuselement auf der Arbeitssystem-Fehlfunktion	86
Abbildung 38:	Schematische Darstellung der vorbereiteten Präsentationsfolie zur Erschließung des Grades der enthaltenen Wissensarbeit im Soll- und Fehlzustand eines Arbeitssystems	87
Abbildung 39:	Prozesssystematisierung über Arbeitssysteme mit Outputs zum SCA-Fertigungsprozess (Pilotierung)	90
Abbildung 40:	Verteilung der Ursachen-Fehlfunktionen der 5M-Prozesseinflüsse im Gesamtprozess	93
Abbildung 41:	Verteilung der Fehlerursachen in den Arbeitssystemen	94
Abbildung 42:	Verteilung der Fehlfunktionen der Arbeitssystemebenen im Gesamtprozess	95

Abbildung 43:	Gegenüberstellung der Ursachen- und Arbeitssystem-Fehlfunktionen in den Arbeitssystemen.....	95
Abbildung 44:	Auszug aus dem Fehlernetz zum Arbeitssystem: Materialmischung vorbereiten	96
Abbildung 45:	Auszug aus dem Fehlernetz zum Arbeitssystem: Druckvorgang ausführen	97
Abbildung 46:	Auszug aus dem Fehlernetz zu den Prozessauswirkungen (Auffälligkeit 1)	98
Abbildung 47:	Auszug aus dem Fehlernetz zu den Prozessauswirkungen (Auffälligkeit 2)	98
Abbildung 48:	Risikobewertung über die Aufgabenpriorität entlang der Arbeitssysteme	100
Abbildung 49:	Verteilung der Wissensaspekte innerhalb der beruflichen Handlungen	101
Abbildung 50:	Einschätzung des Experten zum Grad an potenziell enthaltener Wissensarbeit in den Arbeitssystemen.....	102
Abbildung 51:	Ergebnis zu Einschätzung der Komplexität und Neuartigkeit der Arbeit in den Arbeitssystemen.....	102
Abbildung 52:	Ergebnisse zum Fehlerauftreten in den Arbeitssystemen.....	103
Abbildung 53:	TRR277 – Teilprojekte der Focus Area A mit AMC-Verfahren, Methoden und Material.....	110
Abbildung 54:	Prozesssystematisierung über Arbeitssysteme mit Outputs zum SCA-Fertigungsprozess (A01).....	111
Abbildung 55:	Verteilung der Ursachen-Fehlfunktionen der 5M-Prozesseinflüsse im Gesamtprozess (A01)	114
Abbildung 56:	Verteilung der Fehlerursachen in den Arbeitssystemen (A01)	115
Abbildung 57:	Verteilung der Fehlfunktionen der Arbeitssystemebenen im Gesamtprozess (A01).....	116
Abbildung 58:	Gegenüberstellung der Ursachen- und Arbeitssystem-Fehlfunktionen in den Arbeitssystemen (A01).....	116
Abbildung 59:	Auszug aus dem Fehlernetz zum Arbeitssystem: Bauteil nachbereiten.....	117
Abbildung 60:	Auszug aus dem Fehlernetz zum Arbeitssystem: Bauteil nachbehandeln	117
Abbildung 61:	Auszug aus dem Fehlernetz mit Fokussierung auf die Prozessauswirkung (Beispiel: Prozessstopp)	118
Abbildung 62:	Auszug aus dem Fehlernetz mit Fokussierung auf die Prozessauswirkung (Beispiel: Prozessdurchlauf)	118
Abbildung 63:	Risikobewertung über die Aufgabenpriorität entlang der Arbeitssysteme (A01)	120
Abbildung 64:	Verteilung der Wissensaspekte innerhalb der beruflichen Handlungen (A01)	120
Abbildung 65:	Einschätzung des Experten zum Grad an potenziell enthaltener Wissensarbeit in den Arbeitssystemen (A01).....	122
Abbildung 66:	Ergebnis zu Einschätzung der Komplexität und Neuartigkeit der Arbeit in den Arbeitssystemen (A01).....	122
Abbildung 67:	Ergebnisse zum Fehlerauftreten in den Arbeitssystemen (A01).....	123

Abbildung 68:	Prozesssystematisierung über Arbeitssysteme mit Outputs zum WAAM-Fertigungsprozess (A07).....	126
Abbildung 69:	Verteilung der Ursachen-Fehlfunktionen der 5M-Prozesseinflüsse im Gesamtprozess (A07)	129
Abbildung 70:	Verteilung der Fehlerursachen in den Arbeitssystemen (A07)	129
Abbildung 71:	Fehlernetz und Fehlfunktionen der Maschinenkomponenten zur Erstellung der Bahnplanung	130
Abbildung 72:	Verteilung der Fehlfunktionen der Arbeitssystemebenen im Gesamtprozess (A07).....	130
Abbildung 73:	Gegenüberstellung der Ursachen- und Arbeitssystem-Fehlfunktionen in den Arbeitssystemen (A07).....	131
Abbildung 74:	Auszug aus den Fehlernetzen zum Arbeitssystem: Baujob vorbereiten	131
Abbildung 75:	Auszug aus den Fehlernetzen zum Arbeitssystem: Druckvorgang ausführen	131
Abbildung 76:	Auszug aus den Fehlernetzen zum Arbeitssystem: Bahnplanung erstellen....	132
Abbildung 77:	Auszug aus den Fehlernetzen zum Prozessauswirkung: Drahtförderprobleme....	133
Abbildung 78:	Auszug aus den Fehlernetzen zum Prozessauswirkung: Kontaktrohrabstand zu groß	133
Abbildung 79:	Risikobewertung über die Aufgabenpriorität entlang der Arbeitssysteme (A07)	135
Abbildung 80:	Verteilung der Wissensaspekte innerhalb der beruflichen Handlungen (A07)	135
Abbildung 81:	Einschätzung des Experten zum Grad an potenziell enthaltener Wissensarbeit (A07).....	136
Abbildung 82:	Ergebnis zu Einschätzung der Komplexität und Neuartigkeit der Arbeit in den Arbeitssystemen (A07).....	137
Abbildung 83:	Ergebnisse zum Fehlerauftreten in den Arbeitssystemen (A07).....	137
Abbildung 84:	Prozesssystematisierung über Arbeitssysteme mit Outputs zu AMC-Fertigungsprozessen.....	145
Abbildung 85:	Verteilung der 5M Ursachen-Fehlfunktionen der Fertigungsverfahren.....	147
Abbildung 86:	Verteilung der Prozessauswirkungen der Fertigungsverfahren.....	148
Abbildung 87:	Verteilung der Arbeitssystem-Fehlfunktionen der Fertigungsverfahren.....	149
Abbildung 88:	Verteilung der Wissensanteile in den Fertigungsverfahren	150
Abbildung 89:	Verteilung der Reflexionswissensaspekte in den Arbeitssystemen der Fertigungsverfahren	150
Abbildung 90:	Zusammenfassung der Ergebnisse zu den Kategorien der Fehlerkataloge der Verfahren.....	152
Abbildung 91:	Fehlerauftretende Arbeitssysteme zu den Fehlfunktionen in den Prozessauswirkungen	152
Abbildung 92:	Kategorisierung der Informationsmärkte der Fertigungsverfahren mit Anzahl der Arten (links) und deren Nennungen (rechts)	153

Abbildung 93: Arbeitssystemkorrelationen mit Einschätzung zum Grad an potenziell enthaltenen Wissensarbeit..... 155

8 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Kompetenzmatrix fachlich-methodischer Kompetenzen (vgl. Tabelle 7 in Tenberg et al., 2020, S. 50).....	19
Tabelle 2:	Kompetenzmatrix überfachlicher Kompetenzen (vgl. Tabelle 9 in Tenberg et al., 2020, S. 56).....	20
Tabelle 3:	Definitionsmatrix zur Untersuchung von Wissens- und Nichtwissensarbeit nach Pfiffner & Stadelmann (1995)	23
Tabelle 4:	Abschnitte, Vorgehen und Intentionen des Fachgesprächs zum Rekonstruktionsansatz nach Pittich (2013)	30
Tabelle 5:	Formblatt zum Fertigungsplan des Rekonstruktionsansatzes nach Pittich (2013)	30
Tabelle 6:	Formblatt für Notizen des Rekonstruktionsansatzes nach Pittich (2013).....	31
Tabelle 7:	Checkliste zum Protokoll des Rekonstruktionsansatzes nach Pittich (2013).....	31
Tabelle 8:	Protokoll zur begleitenden Dokumentation der Fehlerursache des Rekonstruktionsansatzes nach Pittich (2013)	31
Tabelle 9:	5Z-Projektplan mit Z-Themenbereichen und Leitfragen	41
Tabelle 10:	Möglicher Aufbau des FMEA-Formblattes zu einer Funktion	45
Tabelle 11:	Systemhierarchie der FMEA-Arten mit Folgen, Fehlern und Ursachen (vgl. AIAG & VDA, 2019, S. 216)	47
Tabelle 12:	Analyseeinheit mit Schritten, Gegenständen und Methodik der MTO-Analyse (vgl. Strohm & Ulich, 1999 sowie Ulich, 2011, S. 88)	49
Tabelle 13:	Tabellarische Zusammenfassung in Gestaltungsphase und Vorgehensweisen der DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2016, S. 11–21	55
Tabelle 14:	Arbeitssystemelemente mit Beschreibung (vgl. Binner, 2011, S. 133 und REFA, 1984, S. 94).....	57
Tabelle 15:	Aufbau und Daten eines Arbeitsablaufplanes (vgl. Eversheim, 1995, S. 80).....	61
Tabelle 16:	Exemplarischer Aufbau mit Daten zum Arbeitsplan (vgl. Cobo Cards Pool, 2010)	62
Tabelle 17:	Präzisierung der Komponenten bzw. Systemelemente eines Arbeitssystems zum Arbeitsmodell	67
Tabelle 18:	Adaptierte Systemhierarchie zur ‚arbeitssystem-basierten Prozess-FMEA‘	69
Tabelle 19:	Auswertungstabelle zur Phase 0	75
Tabelle 20:	Aufbau des Arbeitsablaufplanes zur Auswertung der Phase I.....	77
Tabelle 21:	Exemplarische Darstellung des Aufbaus zur tabellarischen Dokumentation der Daten entlang des FMEA-Formblattes	81
Tabelle 22:	Kompetenzmatrix AMC-relevanter Kompetenzen.....	83
Tabelle 23:	Fehlerkatalog zu den Fehlfunktionen der Prozessauswirkung mit Informationsmärkten und Kontextfaktoren	88

Tabelle 24: Ergebnisse zur Prozessstrukturierung und -systematisierung des SCA-Fertigungsverfahrens (Pilotierung)	91
Tabelle 25: Betrachtungsperspektiven der Tätigkeiten des Arbeitsablaufplans	92
Tabelle 26: Gesamtübersicht der Funktionen und Fehlfunktionen des SCA-Fertigungsprozesses.....	93
Tabelle 27: Verteilung der Fehlfunktionen zur Prozessauswirkung	97
Tabelle 28: Kategorisierung der Ergebnisse zu Vermeidungs- und Entdeckungsmaßnahmen	99
Tabelle 29: Auflistung der Ergebnisse zu den Vorkommnissen im Fehlerkatalog	104
Tabelle 30: Kategorische Darstellung der Informationsmärkte mit Anzahl an Arten und Nennungen.....	105
Tabelle 31: Ergebnisse zur Inter-Rater-Reliabilität der Arbeits-/Betriebs- und Hilfsmittel.....	108
Tabelle 32: Ergebnisse zur Inter-Rater-Reliabilität der Wissensaspekte der Konzeptionsmatrix	109
Tabelle 33: Ergebnisse zur Prozessstrukturierung und -systematisierung des SCA-Fertigungsverfahrens (A01)	112
Tabelle 34: Betrachtungsperspektiven der Tätigkeiten des Arbeitsablaufs (A01).....	113
Tabelle 35: Gesamtübersicht der Funktionen und Fehlfunktionen des SCA-Fertigungsprozesses (A01).....	114
Tabelle 36: Verteilung der Fehlfunktionen zur Prozessauswirkung (A01)	118
Tabelle 37: Kategorisierung der Ergebnisse zu Vermeidungs- und Entdeckungsmaßnahmen....	119
Tabelle 38: Auflistung der Ergebnisse zu den Vorkommnissen im Fehlerkatalog (A01)	124
Tabelle 39: Kategorische Darstellung der Informationsmärkte mit Anzahl an Arten und Nennungen (A01).....	125
Tabelle 40: Ergebnisse zur Prozessstrukturierung und -systematisierung des WAAM-Fertigungsverfahrens (A07)	127
Tabelle 41: Betrachtungsperspektiven der Tätigkeiten des Arbeitsablaufs (A07).....	128
Tabelle 42: Gesamtübersicht der Funktionen und Fehlfunktionen des WAAM-Fertigungsprozesses (A07).....	129
Tabelle 43: Verteilung der dokumentierten Fehlfunktionen zur Prozessauswirkung (A07).....	132
Tabelle 44: Kategorisierung der Ergebnisse zu Vermeidungs- und Entdeckungsmaßnahmen....	134
Tabelle 45: Auflistung der Ergebnisse zu den Vorkommnissen im Fehlerkatalog (A07)	138
Tabelle 46: Kategorische Darstellung der Informationsmärkte mit Anzahl an Arten und Nennungen (A07).....	139
Tabelle 47: Zusammenfassung der Tätigkeiten aus den Betrachtungsperspektiven der Fertigungsverfahren.....	146
Tabelle 48: Arbeitssystemeinfluss- und -auswirkungsmatrix zum SCA-Verfahren der Pilotierung	154

9 Abkürzungsverzeichnis

A	Auswirkung / Fehlerauftreten
AIAG	Automotive Industry Action Group
AM	Additive Manufacturing
AMC	Additive Manufacturing in Construction
AS	Arbeitssystem
BP	Betrachtungsperspektive
DFMEA	Design Failure Mode and Effect Analysis
DIN	Deutsches Institut für Normung
E	Einflüsse / Fehlerursprung
FA	Fehlertretendes Arbeitssystem
FF	Fehlfunktion
FMEA	Failure Mode and Effect Analysis
FP	Fehlfunktion Prozessauswirkung
HT	Haupttätigkeiten
IRR	Inter-Rater-Reliabilität
IM	Informationsmärkte
KABA.....	Kontrastive Aufgabenanalyse
KF	Kontextfaktoren
MES	Manufacturing Execution Systemen
MTO	Mensch-Technik-Organisation
PW	Prozesswissen
RHIA.....	Regulationshindernissen in der Arbeitstätigkeit
RW	Reflexionswissen
SAA	Subjektive Arbeitsanalyse
SALSA	Salutogenetische Subjektive Arbeitsanalyse
SCA	Selective Cement Activation
SCA-P	Selective Cement Activation – Pilotierung
SPEC	Specification
SPI	Selective Paste Intrusion
SW	Sachwissen
VDA	Verband der Automobilindustrie
VERA	Verfahren zur Ermittlung von Regulationserfordernissen in der Arbeitstätigkeit
VERA-KHR	Verfahren zur Ermittlung von Regulationserfordernissen in der Arbeitstätigkeit – kollektive Handlungsregulation
V-n-T	Vor- und nachbereitende Tätigkeiten
WAAM	Wire and Arc Additive Manufacturing
X	Bauteilprüfung/-Endkontrolle

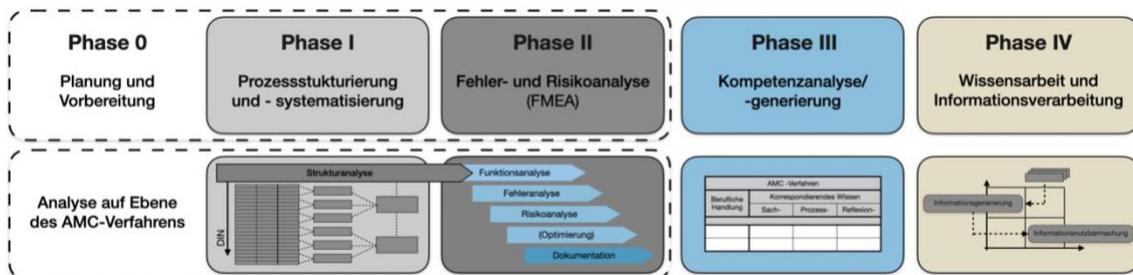
Handbuch zum Forschungsansatz – Umsetzung und Moderation

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	176
2	Phase 0: Vorbereitung und Planung	177
3	Phase I: Strukturierung und Systematisierung.....	179
4	Phase II: Fehler und Risikoanalyse.....	185
5	Phase III: Kompetenzanalyse/-generierung.....	198
6	Phase IV: Wissensarbeit und Informationsverarbeitung.....	203

1 Einleitung

Begleitend zur Umsetzung des Forschungsansatzes sollte dieses Handbuch verwendet werden. Das Handbuch greift nochmal explizit die ausgewiesenen Schritte der fünf Phasen (HB – Abbildung 1) auf und reichert diese mit Ankerbeispielen und Formulierungssammlungen sowie mit Leitfragen zur Moderation an. Phase 0 skizziert die rahmenden Bedingungen der folgenden Analysen in einer Übersichtstabelle zum AMC-Verfahren. Daraufhin erfolgt in Phase I die Prozessstrukturierung über den Arbeitsablaufplan sowie die Prozesssystematisierung über den Arbeitssystembaum. Mit dieser Strukturanalyse schließt das Vorgehen zur FMEA in Phase II an. Im Rahmen von Phase III und ausgehend von der umgesetzten Datenbasis erfolgt die Kompetenzanalyse bzw. -generierung. Weiter wird in Phase IV die Fehleranalyse aus Phase II für das Thema Wissensarbeit und Informationsverarbeitung genutzt und ein Fehlerkatalog erstellt. Die folgenden Kapitel und damit der Aufbau des Handbuches orientieren sich chronologisch zur Umsetzung an diesen Phasen.



HB – Abbildung 1: Methodisches Vorgehen zum Forschungsansatz

2 Phase 0: Vorbereitung und Planung

Ziel der Phase 0 ist es, die AMC-Experten kennenzulernen, einen ersten Überblick zum AMC-Verfahren zu erhalten, die Vorgehensweisen in Erfahrung zu bringen und die herstellbaren Produkte und Geometrien zu spezifizieren.

Schritt P0-1: Kontaktaufnahme und Kennenlernen

Über den ersten Schritt wird mit den Experten des zu untersuchenden AMC-Verfahrens Kontakt aufgenommen und ein (virtuelles) Auftaktmeeting organisiert. Bei Kontaktaufnahme (per E-Mail) wird folgende Guideline angehängt:

Thema: Beschreibung des AMC-Verfahrens und des Prozessablaufs

Publikum: Grobe Kenntnisse der verschiedenen AMC-Verfahren

Zeitvorgabe: ca. 20 - 25 min

Präsentation: via Zoom; PowerPoint (ggf. Videos)

Struktur:

- Kurze schematische Erklärung und Übersicht des Prozesses, ggf. Abgrenzung/Einordnung in die anderen AMC-Verfahren (*Übersicht*)
- Rahmenbedingungen des AMC-Verfahrens (*Rahmenbedingungen*)
 - Übersicht des Geräts / der Geräte
 - Mögliche, herstellbare Geometrien
 - Datenübermittlung zum Gerät
 - Verwendbare Materialien
- Darstellung des Prozesses – Schritt für Schritt (*Prozess*)
 - Einteilung in Pre-Prozess, In-Prozess und Post-Prozess
 - Mögliche, noch nicht behandelte weitere Arbeitsschritte – sofern absehbar (z. B. Transport, Installation etc.)
- Auswertungen zu Bauteileigenschaften (*Bauteileigenschaften*)
 - Bisher erreichte Material- oder Produkteigenschaften
 - Bisherige und geplante Methoden zur Qualitätsüberwachung (z. B. Druckfestigkeitsversuche, optische Beurteilung, Überwachungssensoren etc.)



Abbildung: Struktur der Präsentation

In dem Meeting stellen sich die Experten selbst mit ihrer Rolle in der Entwicklung sowie das AMC-Verfahren vor. Eine daran anschließende offene Besprechung sollte dabei zur Vervollständigung der Daten (HB – Tabelle 1) dienen und ggf. die Übermittlung relevanter Dokumente anbahnen.

Schritt P0-2: Dokumentation der rahmenden Daten

Mit dem zweiten Schritt zur Phase 0 werden die Daten des Meetings zusammen mit den angesprochenen, relevanten Dokumenten in HB – Tabelle 1 eingetragen bzw. zusammengeführt.

HB – Tabelle 1: Auswertungstabelle zur Phase 0

AMC-Verfahren		[...]															
Organisation		[...]															
Projekt-Zusammenfassung (Kurzbeschreibung)		[...]															
Elemente der Konstruktion		[...]															
Ziele und Meilenstein(e)		[...]															
Meilenstein		Quartal								Beschreibung							
[Meilenstein-Nummer]		[mm/jj]								[...]							
Strategie																	
WP	Beschreibung	2020				2021				2022				202x			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
x.x	[Inhalt]																
Personalstruktur																	
Person									Zuständigkeit								
[Titel, Name, Vorname]									[...]								
Druckverfahren									[Schritte des Druckvorgangs]								
Technikeinsatz									[3D-Fertigungsmaschine]								
Materialeinsatz																	
Aggregate				Binder				Additive				Activator					
[...]				[...]				[...]				[...]					
FMEA – Projektplan																	
Z-Themenbereiche									Leitfragen								
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ziel und Zweck der FMEA ▪ Teamzusammensetzung mit Aufgabenzuweisung ▪ Werkzeuge ▪ Zeitplan 									<ul style="list-style-type: none"> ▪ Erfassung der Fehlerzusammenhänge mit Folge 1) Prozessauswirkung 2) Bauteileigenschaft; mit aktuellen Maßnahmen und deren Bewertung ▪ 1) [Expert:innen (Aufgaben)] 2) [Name bgeleitende/r Bauingenieur:in] Moderator:in, Schriftführer:in Tobias Ludwig (Moderator, Schriftführer) ▪ APIS, Maschinenbaum, Arbeitssystembaum Arbeitsablaufplan ▪ [Geplanter Analysezeitraum] 								

3 Phase I: Strukturierung und Systematisierung

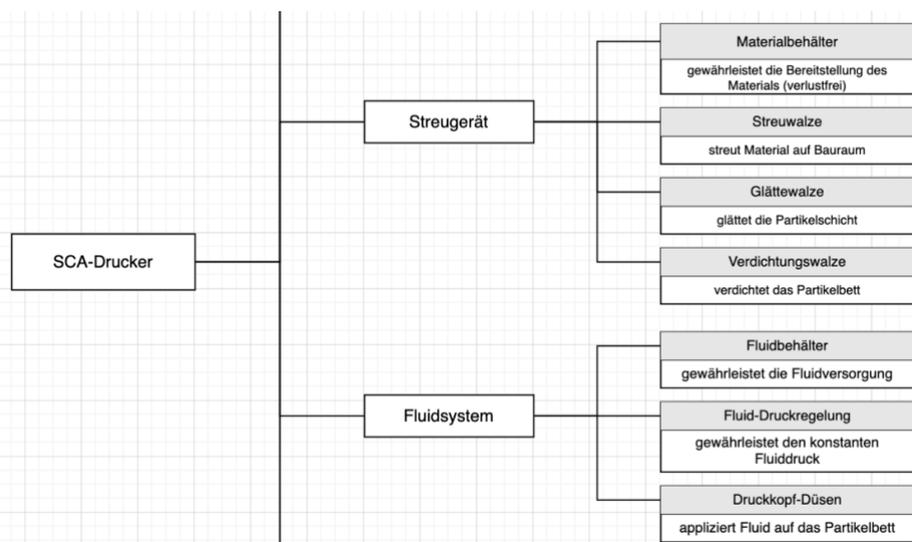
Ziel der Phase I ist es, den AMC-Fertigungsprozess über die ablaufenden Tätigkeiten – vom CAD-Design bis zum finalen Produkt – im Arbeitsablaufplan zu explizieren, entlang der DIN SPEC 17071 zu strukturieren und über die Generierung von Arbeitssystemen über drei Ebenen zu systematisieren.

Schritt PI-1: Prozessbeobachtung

Mit dem ersten Schritt in Phase I wird eine ablauforientierte Prozessbeobachtung durchgeführt. Diese findet in den tatsächlichen AMC-Fertigungsumgebungen statt und begleitet die Experten über den gesamten AMC-Fertigungsprozess – vom Design des Produktes bis zum fertigen Bauteil. Die Prozessbegleitung wird adäquat audiovisuell aufgezeichnet und die Tätigkeiten bestenfalls zeitgleich von den Experten kommentiert bzw. erläutert. Wichtig ist, dass der Prozess mit dessen Handhabungen, Parametern, den verwendeten Dokumenten etc. akribisch aufgezeichnet und verfolgt wird und dass bei zu schnellen Arbeitsschritten oder Unklarheiten nachgefragt wird, so dass mit dieser Beobachtung ein detaillierter, lückenloser Einblick in den gesamten AMC-Fertigungsprozess erschlossen wird. Zudem sollten die Programmbildschirme gefilmt werden. Die Beobachtung vor Ort verifiziert dabei Teilinhalte der Präsentation aus Phase 0.

Schritt PI-1.5: Maschinenbaum

Sollte zur AMC-Fertigungsanlage kein Maschinenbaum vorliegen, wird vom begleitenden Bauingenieur und den Experten des AMC-Verfahrens ein Maschinenbaum erstellt – falls vorhanden können hierfür auch anlagenbetreuende Personen hinzugeholt werden. Dies geschieht gemeinsam vor Ort oder im Anschluss an Schritt PI-1. Ziel des Maschinenbaums (HB – Abbildung 2) ist es, alle relevanten Anlagen- bzw. Maschinenteile zu dokumentieren, zu gruppieren und damit zu strukturieren. Hierbei werden eine einheitliche Nomenklatur geschaffen, Gruppierungen von Anlagenteilen erschlossen sowie deren Zweck bzw. Anforderungen expliziert.



HB – Abbildung 2: Maschinenbaum mit Maschinenteilen und deren Gruppierungen des SCA-Druckers

Der Detaillierungsgrad bzw. die Betrachtungstiefe liegt dabei im Ermessen der Experten – wobei hier und auch für die weiteren Schritte immer der Grundsatz gilt: *„Stellt der festgelegte Betrachtungsumfang während der Analyse ein Risiko dar, das nicht akzeptabel bzw. nicht einzuschätzen ist, ist eine weitere Detaillierung erforderlich“*. Mit der Erschließung des Komponentenzwecks bzw. der -anforderung wird bereits ein erster Teil zur FMEA angestoßen. Zur Moderation leiten die Fragen (Funktionen in Grün):

- Ihr habt uns die Anlage gezeigt, [...] / Wie ist dieses [Anlagenelement] aufgebaut?
- Ist dieses [Anlagenelement] einer Gruppierung zuzuordnen?
- Welchen Zweck bzw. welche Funktion erfüllt das [Anlagenelement]?
- Welche Anforderungen bestehen an das [Anlagenelement]?

Zur Dokumentation wird der Satzbau der Funktionen vorgegeben:

- Anlagenelement + Verb (bspw. positioniert) + Substantiv + ggf. Adjektiv (bspw. verlustfrei)
- Anlagenelement + gewährleistet (definierte) + Substantiv

Schritt PI-2: Analyse und Auswertung der Tätigkeiten

Mit Schritt PI-2 gilt es, die observierten Tätigkeiten aus den Videodateien in die Excel-Vorlage zum Arbeitsablaufplan (HB – Tabelle 2) zu explizieren. Die observierten Tätigkeiten können bereits den ‚relevanten Bereichen‘ der DIN SPEC 17071 zugeordnet werden.

HB – Tabelle 2: Aufbau des Arbeitsablaufplanes zur Auswertung der Phase I

Tätigkeit	Arbeits-/Betriebsmittel		Hilfsmittel	Anmerkungen
	Anlagenelement	Werkzeug		
[Relevanter Bereich der DIN SPEC 17071]				

Die Explikation der Tätigkeiten in Spalte 1 erfolgt über den kleinstmöglichen physischen Mehrwert im Prozess und wird über ein Substantiv in Verbindung mit einem Verb dokumentiert. Die Substantive beziehen sich zumeist auf Materialien (Sand, Zement etc.), Erzeugnisse (Parameter, Sketch, Dateien etc.), Gegenstände oder auf Arbeits-/Betriebs-/Hilfsmittel, u. a. aus dem Maschinenbaum. Für die Explikation der Verben sollte die Formulierungssammlung (HB – Tabelle 3) verwendet werden.

HB – Tabelle 3: Formulierungssammlung der Verben-Explikation im Arbeitsablaufplan

ein-/ausschalten	säubern	starten	beschriften	schneiden	absprühen
festlegen	einlegen	öffnen	wiegen	tarieren	warten
transportieren	auswählen	speichern	eingeben	säubern	absaugen

bereitstellen	importieren	anordnen	exportieren	fördern	ausbauen
positionieren	auswählen	übermitteln	drucken	bestimmen	laden
an-/mischen	umstellen	bestellen	übergabe	entnehmen	einfüllen
de-/aktivieren	verfahren	schließen	sichten	aufräumen	montieren
ver-/schließen	drücken	einstellen	kontrollieren	reinigen	einräumen
an-/abfahren	einstecken	befüllen	prüfen	leeren	einrichten
anschießen					

Zu Schritt PI-2 gelten zudem folgende Grundsätze:

- Wiederholende Tätigkeitsabläufe werden nachvollziehbar vermerkt und die Videodateien werden gekennzeichnet.
- Audiell beschriebene und visuell zu sehende Arbeitsschritte sowie „warten“ werden als Tätigkeiten expliziert.
- Da es möglich ist, dass mehrere Personen zeitgleich arbeiten, kann es partiell notwendig sein, auch die Tätigkeiten von Mitarbeitenden im Hintergrund zu beobachten und schlüssig in den Arbeitsablaufplan zu integrieren.
- Der explizierte Prozess über die ablaufenden Tätigkeiten muss in dessen Logik nachvollziehbar sein.
- Sollten bei der Observation Fehler(-meldungen) aufgetreten sein, werden diese im Arbeitsablaufplan nur in den Anmerkungen dokumentiert und die Videodateien gekennzeichnet.

Das bedeutet, dass der Arbeitsablaufplan nach der Auswertung die reinen, fehlerfreien Tätigkeiten – vom Design bis zum fertigen Produkt – enthält.

Schritt PI-3: Analyse und Auswertung der Arbeits-/Betriebs-/Hilfsmittel und Anmerkungen

Zu den Tätigkeiten werden die verwendeten Arbeits-/Betriebsmittel (Spalte 2 und 3) und Hilfsmittel (Spalte 4) dokumentiert und ggf. über Anmerkungen in Spalte 5 ergänzt:

- Die Anlagenelemente werden direkt aus dem Maschinenbaum übernommen.
- Werkzeuge sind Geräte oder Gegenstände, die zur Ausführung des Arbeitssystems zwingend erforderlich sind und zu einer aktiven Veränderung im Transformationsprozess beitragen. Werkzeuge sind beispielsweise Bohrmaschine, Hammer, Waage, CAD-Programme bzw. Software etc.
- Hilfsmittel sind hingegen Geräte oder Gegenstände, die zur Ausführung des Arbeitssystems nicht zwingend erforderlich sind und lediglich zur einfacheren Handhabung im Arbeitsablauf beitragen. Beispiele hierfür wären Schaufeln, Zangen, Hubwagen, Schraubendreher, Excel-Tabellen etc.
- Die Anmerkungen liefern zusätzliche Erklärungen, beschreiben Zusammenhänge, sind eine erweiterte Erklärung zum besseren Verständnis des Arbeitsschrittes oder dokumentieren aufgetretene Fehlerbilder.

Schritt PI-4: Besprechung zum Arbeitsablaufplan

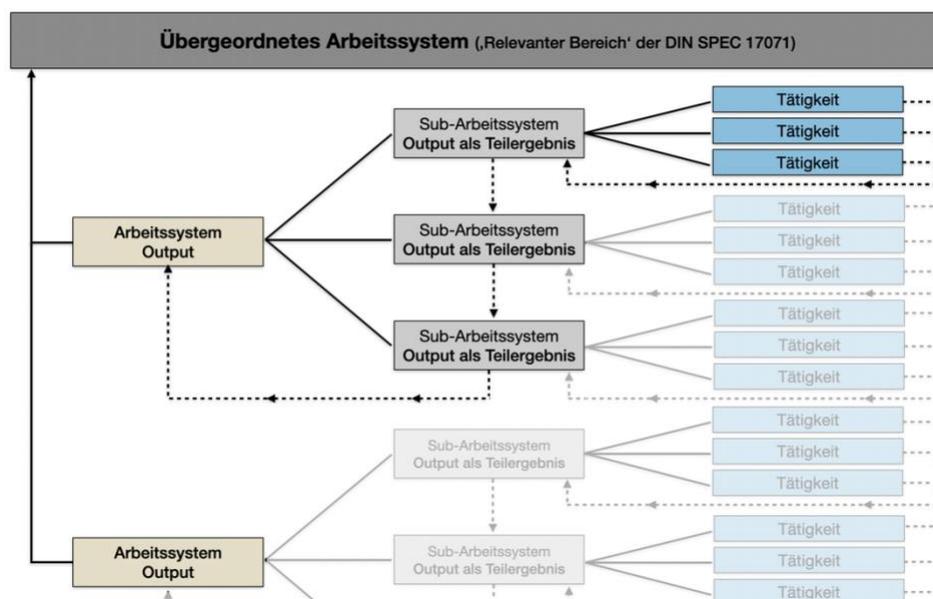
Den Arbeitsablaufplan gilt es anschließend mit den Experten zu besprechen und hinsichtlich fehlender Tätigkeiten zu ergänzen sowie gegebenenfalls mit Fachbegriffen anzupassen. Die ergänzten Tätigkeiten werden kenntlich gemacht.

Schritt PI-5: Unterscheidung in Haupt- bzw. vor- und nachbereitende Tätigkeiten

Mit dem Schritt PI-5 werden die Haupt- bzw. vor- und nachbereitenden Tätigkeiten im Arbeitsablaufplan kenntlich gemacht. Die Haupttätigkeiten sind aktiv auf die Erzeugung eines Outputs gerichtet, die vor- und nachbereitenden Tätigkeiten richten den Arbeitsplatz ein, stellen den Input bereit, räumen den Arbeitsplatz auf bzw. bereiten den Input entsprechend nach.

Schritt PI-6: Generierung der Sub-Arbeitssystemebene

Nach der Strukturierung des AMC-Fertigungsprozesses über den Arbeitsablaufplan erfolgt die Systematisierung entlang von Arbeitssystemen über drei Ebenen (HB – Abbildung 3).



HB – Abbildung 3: Logik zur Generierung von Arbeitssystemen über (Teil-)Ergebnisse bzw. Outputs

Mit Schritt PI-6 werden die Outputs der Sub-Arbeitssysteme im Arbeitsablaufplan identifiziert, dadurch die Sub-Arbeitssysteme generiert und hierzu die vor- bzw. nachbereitenden Tätigkeiten schlüssig zugeordnet. Die Sub-Arbeitssysteme werden dabei konkret über mehrere zielgerichtete Haupttätigkeiten (mindestens zwei) und die dadurch entstehenden Teilergebnisse erschlossen. Anhaltspunkte zum Abschluss eines Arbeitssystems sind die sogenannten ‚Outputs‘, die durch die Haupttätigkeiten erzeugt werden. Wie das Beispiel aus HB – Tabelle 4 zeigt, ist das Sub-Arbeitssystem ‚Materialmischung abfüllen‘ erst dann vollständig, wenn die Materialfüllung umgefüllt, der Abfüllbehälter verschlossen und beschriftet ist. Wichtig an dieser Stelle ist, dass eine Haupttätigkeit allein kein Sub-Arbeitssystem darstellt und durch eine mögliche Neuordnung dieser Tätigkeiten keine definierten Reihenfolgen eliminiert werden. In HB – Tabelle 4 wird zum Beispiel das Wiegen der jeweiligen Materialien zusammengefasst und der

Output ‚Materialmengen abwiegen‘ entsteht. Das Ausfüllen des Mischzettels wird jedoch nach dem Wiegen der Quarzsandfolie durchgeführt, da in der Exceltabelle zur Materialmengenbestimmung der tatsächliche Wert zur Quarzsandmenge eingegeben wird, um Abweichungen zu verringern. Hier könnte für die weiteren Schritte zur FMEA eine Methodik ableitbar sein, welche durch die Neuordnung von Tätigkeiten nicht verloren gehen sollte. Daher wird dieser Bereich markiert und das Sub-Arbeitssystem an dieser Stelle eingebettet. Für die Benennung des Sub-Arbeitssystems wird (wenn möglich) das Teilerzeugnis als Substantiv und bei den tätigkeitsbeschreibenden Verben wiederum die Formulierungssammlung (siehe HB – Tabelle 3) verwendet. Die Teil-Outputs werden zusätzlich als Zellenotiz vermerkt bzw. anderweitig dokumentiert.

HB – Tabelle 4: Analyse, Bündelung und Strukturierung der Tätigkeiten in Sub-Arbeitssysteme

Sub-AS	Zugeordnete Tätigkeiten	Observierte Tätigkeiten
Materialmengen abwiegen	Waage bereitstellen	Mischer bereitstellen
	Mischbehälter bereitstellen	Abfüllbehälter bereitstellen
	Feinwaage bereitstellen	Waage bereitstellen
	Mischbehälter bereitstellen	Mischbehälter bereitstellen
	Absaugung bereitstellen	Absaugung bereitstellen
	Stromvers. einrichten	Stromvers. einrichten
	Schaufel bereitstellen	Quarzsand bereitstellen
	Quarzsand bereitstellen	Zement bereitstellen
	Zement bereitstellen	Deckel bereitstellen
	Methylcellulose bereitstellen	Trichter bereitstellen
	Mischbehälter positionieren	Schaufel bereitstellen
	Waage tarieren	Quarzsand wiegen
	Quarzsand wiegen	Quarzsand einfüllen
	(Quarzsand einfüllen)	Quarzsandfolie wiegen
Quarzsandfolie wiegen	Exceltabelle öffnen	
Mischzettel ausfüllen	Mischzettel bereitstellen	Quarzsandmenge eingeben
	Exceltabelle öffnen	Materialmenge ablesen
	Quarzsandmenge eingeben	Materialmenge notieren
	Materialmengen ablesen	Mischbehälter positionieren
	Materialmengen notieren	Waage tarieren
	Mischzettel drucken	Zementbehälter öffnen
	Mischzettel übergeben	Absaugung positionieren
	Zementbehälter öffnen	Absaugung einschalten
	Absaugung positionieren	Zement wiegen
	Absaugung einschalten	Zementbehälter verschließen
	Zement wiegen	Absaugung positionieren
	Zementbehälter verschließen	Zement einfüllen
	Zement aufräumen	Deckel anbringen
	Mischbehälter positionieren	Mischer neigen
	Feinwaage tarieren	Mischer einschalten

	Methylcell.-behälter öffnen	45 sec. warten
	Methylcellulose wiegen	Mischer neigen
	Methylcell.-behälter verschließen	45 sec. warten
	Methylcellulose aufräumen	Absaugung positionieren
	Waage aufräumen	Deckel öffnen
Material- mischung herstellen	Mischer bereitstellen	Mischung prüfen
	Deckel bereitstellen	Trichter positionieren
	Trichter bereitstellen	Absaugung positionieren
	Absaugung bereitstellen	Materialmischung umfüllen
	Stromvers. einrichten	Abfüllbehälter verschließen
	Absaugung positionieren	Methylcellulose bereitstellen
	Quarzsand einfüllen	Feinwaage bereitstellen
	Zement einfüllen	Mischbehälter bereitstellen
	Methylcellulose einfüllen	Methylcellulose wiegen
	Deckel anbringen	Methylcellulose einfüllen
	Mischer neigen	Methylcellulose aufräumen
	Mischer einschalten	Mischer aufräumen
	45 sec. warten	Zement aufräumen
	Mischer neigen	Trichter aufräumen
	45 sec. warten	Waage aufräumen
	Absaugung positionieren	Trichter aufräumen
	Deckel öffnen	Waage aufräumen
	Mischung prüfen	
Material- mischung abfüllen	Abfüllbehälter bereitstellen	
	Trichter positionieren	
	Absaugung positionieren	
	Materialmischung umfüllen	
	Abfüllbehälter verschließen	
	Abfüllbehälter beschriften	
	Absaugung aufräumen	
	Mischer aufräumen	
Trichter aufräumen		
Lager einräumen	Hubwagen bereitstellen	
	Materialmisch. transportieren	
	Materialmisch. einräumen	
	Hubwagen aufräumen	

Schritt PI-7: Generierung der Arbeitssystemebene

Zu Schritt PI-7 gilt es, die Arbeitssystem-Outputs aus den Abläufen der Sub-Arbeitssysteme zu identifizieren und zu generieren (siehe HB – Abbildung 3). Da entlang der Sub-Arbeitssysteme lediglich Teilergebnisse erstellt werden, können diese in Summe und in deren Ablauf zu vollständigen Ergebnissen bzw. Outputs zusammengeführt werden. Um am Beispiel der HB – Tabelle 4 anzuknüpfen: Sind die Materialmengen ermittelt, die Materialmengen abgewogen, die Materialmischung hergestellt und abgefüllt sowie diese am Zielort, ist das Arbeitssystem

„Materialmischung vorbereiten“ abgeschlossen. Die Arbeitssystem-Outputs werden ebenfalls als Zellennotiz vermerkt bzw. anderweitig dokumentiert und können zudem über Adjektive spezifiziert werden. Hinzu kommt, dass baujobspezifische Arbeitssysteme von baujob-unabhängigen Arbeitssystemen unterschieden werden können. Letztere, wie beispielsweise das ‚Vorbereiten der Anlage‘, werden zu jedem AM-Fertigungsprozess gleich ausgeführt.

Schritt PI-8: Revision

Mit dem Schritt PI-8 erfolgt eine Revision des gesamten Arbeitssystembaums. Hierzu wird insbesondere die Logik (HB – Abbildung 3) mit der Bündelung von Tätigkeiten als Arbeitsabläufe der Sub-Arbeitssysteme und deren Teil-Outputs, die Zusammenfassung von Sub-Arbeitssystemen zu den Arbeitssystemen und deren Outputs sowie die Zuordnung der Arbeitssysteme zu den übergeordneten Arbeitssystemen reflektiert. Die Summe der Arbeitssystem-Outputs schließt dabei die Organisationseinheit („relevante Bereiche“ der DIN SPEC 17071) ab.

Schritt PI-9: Besprechung zum Arbeitssystembaum

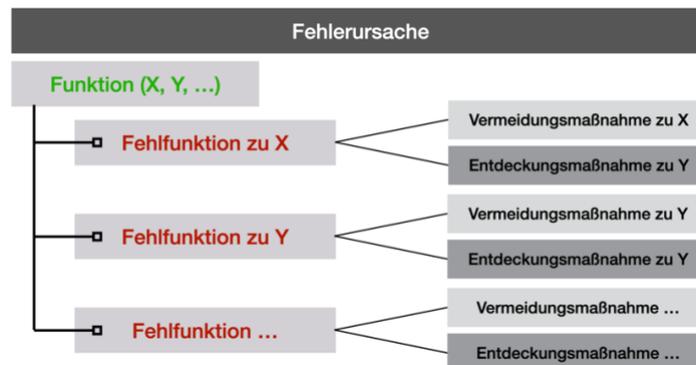
Abschließend zur Phase I werden der Arbeitssystembaum mit den Arbeitssystemelementen und deren Outputs intensiv mit den Experten (virtuell) rückbesprochen, ergänzt oder gegebenenfalls angepasst und dadurch verifiziert. Dieser Schritt und auch die konkrete, nachvollziehbare Benennung des Outputs sind wichtig, da die Arbeitssysteme und deren Ergebnisse in die FMEA überführt werden und dadurch die Grundlage der weiteren Erhebung sind.

4 Phase II: Fehler- und Risikoanalyse

Ziel der Phase II ist es, die Einflussfaktoren und deren Zusammenhänge in ihrer Komplexität entlang der Fehler- und Risikoanalyse zu erschließen und zusammen mit den aktuellen Vermeidungs- und Entdeckungsmaßnahmen inklusive Bewertung im Formblatt zur FMEA zu dokumentieren. Hierfür wird das FMEA-typische Format von Workshops genutzt, da nur so gemeinsam mit den Experten die Schritte zur FMEA erarbeitet werden können. Die Dokumentation der Ergebnisse erfolgt in der FMEA-Software APIS. Die Durchführung der FMEA ist durchaus komplex und sollte zu bestmöglichen Ergebnissen führen. Daher erscheint es auch vor dem Hintergrund der wissenschaftlichen Fundiertheit hilfreich und zielführend, sich an Grundsätzen zu orientieren:

- Alle Funktionen sowie Fehlfunktionen werden von den Experten erschlossen und nicht von den FMEA-Moderatoren allein bestimmt. Die Dokumentation der Funktionen und Fehlfunktionen wird dabei gemeinsam vorgenommen bzw. abgesprochen.
- Je detaillierter/genauer die Fehlfunktionen des Arbeitssystems bestimmt werden, desto spezifischer/genauer können diese Fehlfunktionen den Folgen/Auswirkungen auf die Bauteileigenschaften zugeordnet werden. Die gesamte FMEA wird dadurch aussagekräftiger.

- Zu jeder Funktion mit deren Anforderung X, Y etc. der Ursachenseite gibt es mindestens eine Fehlfunktion – inklusive ‚keine‘. Die Formulierung der Funktion bzw. die in den Klammern dokumentierten Anforderungen bestimmen die Anzahl der Fehlfunktionen. Die Fehlfunktionen sind hierbei immer die Negation der jeweiligen Anforderung. Zu jeder Fehlfunktion gibt es nur eine bestimmte Vermeidungs- und Entdeckungsmaßnahme (HB – Abbildung 4).



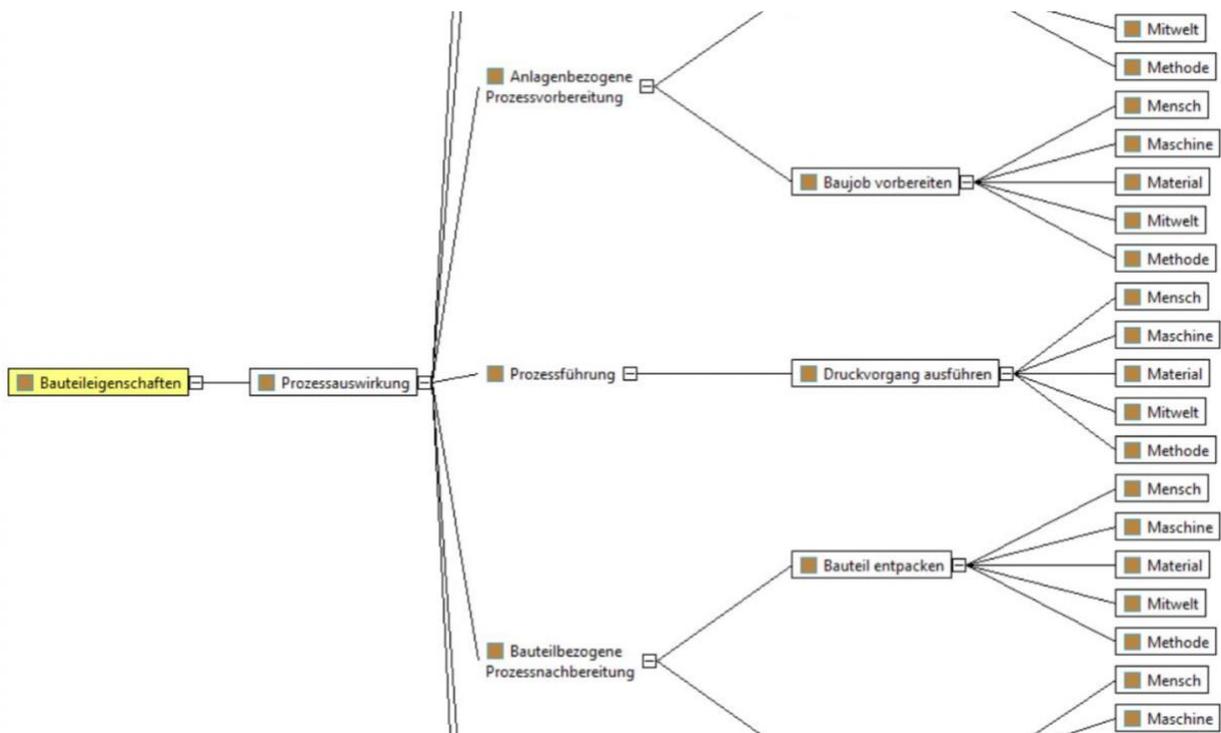
HB – Abbildung 4: Zusammenhang der Funktionen und Fehlfunktionen im Untersuchungsgebiet der Fehlerursache

- Sollte etwas ‚definiert/richtig/korrekt‘ oder ‚nach Vorgabe‘ erfolgen, werden diese Vorgaben oder Dokumente hinter der Funktion – ähnlich zu den Anforderungen – in Klammern festgehalten. Die Untersuchung zur Definition bzw. Vorgabe (Spezifikation) erfolgt im Systemelement ‚Methode‘ des vorkommenden Arbeitssystems.
- Stellt der festgelegte Betrachtungsumfang während der Analyse ein Risiko dar, das nicht akzeptabel bzw. nicht einzuschätzen ist, ist eine weitere Detaillierung erforderlich.

Bevor die regulären Schritte zur FMEA nach AIAG & VDA 2019 umgesetzt werden, gilt es, die Systemstruktur in der FMEA-Software APIS zu erstellen (Schritt PII-1) sowie die bereits erhobenen, relevanten Daten zu überführen (Schritt PII-2).

Schritt PII-1: Vorbereitung der Systemelemente in APIS

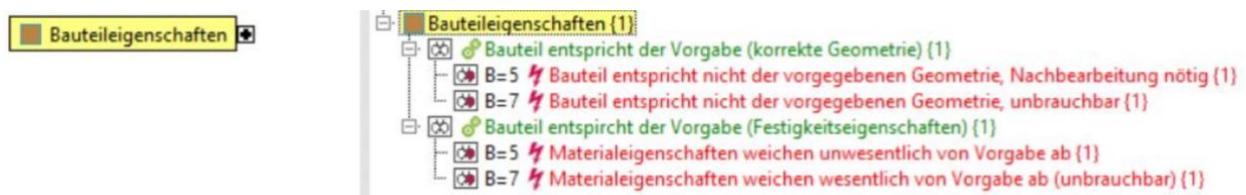
Die FMEA-Struktur in APIS (HB – Abbildung 5) hat die Systemelemente ‚Bauteileigenschaften‘ sowie ‚Prozessauswirkungen‘ zur Fehlerfolge und wird in entsprechender Reihenfolge als Systemelemente erstellt. Daran werden die Systemelemente der ‚Übergeordneten Arbeitssysteme‘ als Zwischenebene – mit einer rein strukturierenden Funktion – angehängt. Zur Fehlerart werden die Arbeitssysteme aus dem Arbeitssystembaum als Systemelemente übernommen. Daran schließen jeweils die Systemelemente ‚Mensch‘, ‚Maschine‘, ‚Material‘, ‚Mitwelt‘ und ‚Methode‘ aus den 5M's zur Prozess-FMEA an.



HB – Abbildung 5: Vorbereitete FMEA-Struktur in APIS (Beispiel: SCA)

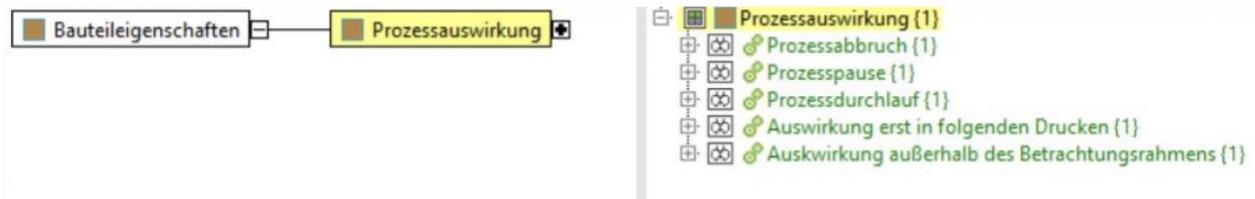
Schritt PII-2: Vorstrukturierung in den Systemelementen

Die Bauteileigenschaften (HB – Abbildung 6) können bereits im Vorfeld mit Funktionen zur Bauteilgeometrie und Materialeigenschaften vorstrukturiert werden. Hinzu kommen deren vorgegebenen Fehlfunktionen und Bedeutungsbewertung: ‚Bauteil entspricht nicht der vorgegebenen Geometrie, Nachbearbeitung nötig‘ mit B = 5, ‚Bauteil entspricht nicht der vorgegebenen Geometrie, unbrauchbar‘ mit B = 7 sowie ‚Materialeigenschaften weichen unwesentlich von Vorgabe ab‘ mit B = 5 und ‚Materialeigenschaften weichen wesentlich von Vorgabe ab (unbrauchbar)‘ mit B = 7.



HB – Abbildung 6: Systemelement ‚Bauteileigenschaften‘ mit Funktionen und Fehlfunktionen in APIS zur Fehlerfolge

Zu den Prozessauswirkungen werden die Funktionen (HB – Abbildung 7) zum ‚Prozessdurchlauf‘, ‚Prozesspause‘, ‚Prozessabbruch‘, ‚Auswirkung auf Folgeprozesse‘ und ‚Auswirkung außerhalb des Betrachtungsrahmens‘ erstellt. Die Erschließung der Fehlfunktionen erfolgt induktiv.

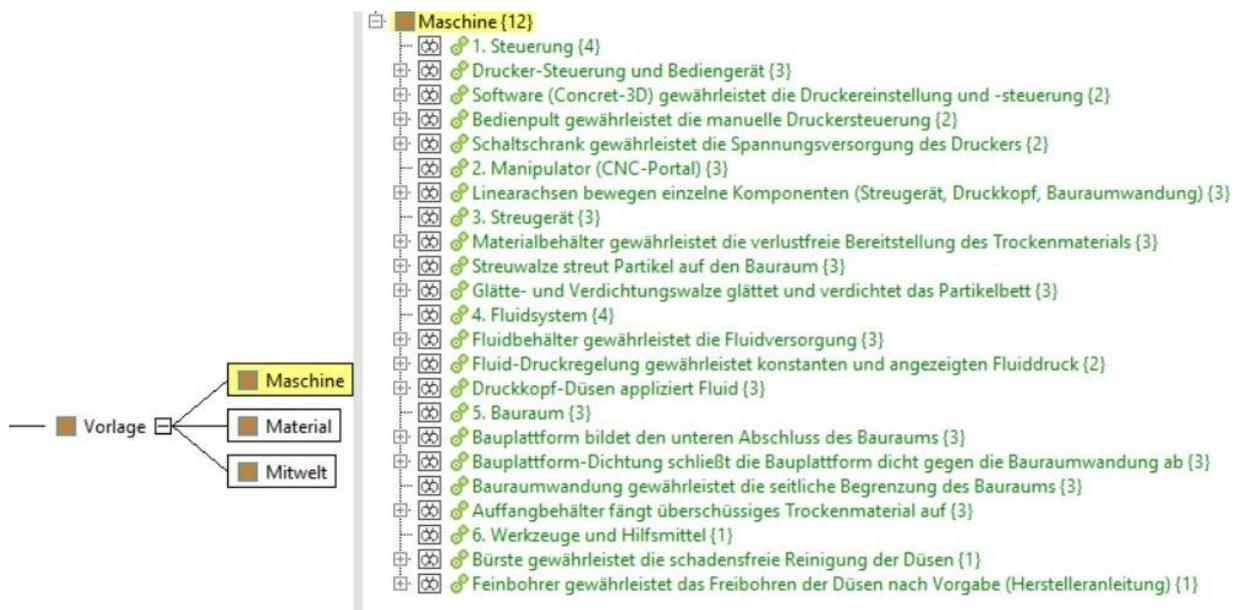


HB – Abbildung 7: Systemelement 'Prozessauswirkung' mit vorstrukturierten Funktionen

Zudem können die erhobenen Daten aus dem Maschinenbaum, dem Arbeitsablaufplan sowie aus dem Arbeitssystembaum zur Strukturierung der 5M-Ursachenelemente verwendet werden. Zur 1) Maschine, 2) Material und 3) Mitwelt wird dabei ein Systemelement „Vorlage“ angelegt, da diese später in die notwendigen Bereiche kopiert und eingefügt werden. Zu 4) Mensch und 5) Methode werden spezifische Daten überführt und diese entsprechend in den jeweiligen Systemelementen ergänzt.

1) Maschine (HB – Abbildung 8)

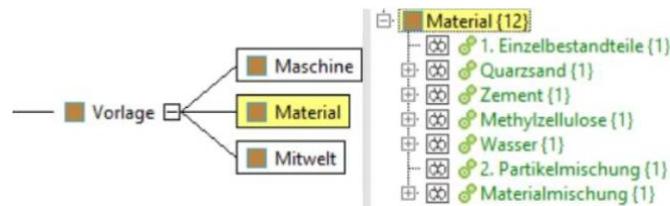
Aus dem Maschinenbaum können alle Funktionen in die Vorlage zum Systemelement ‚Maschine‘ überführt werden. Die Gruppierungen werden hierbei als Funktionskategorien übernommen.



HB – Abbildung 8: Systemelement ‚Maschine‘ als Vorlage mit Funktionen und Funktionskategorien (Beispiel: SCA)

2) Materialien (HB – Abbildung 9)

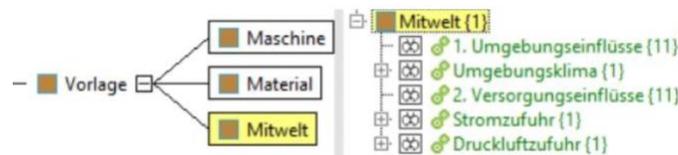
Alle im Arbeitsablaufplan dokumentierten Materialien werden in der Vorlage zum Systemelement ‚Material‘ aufgelistet werden. Diese können den Funktionskategorien ‚Einzelbestandteile‘ sowie ‚Mischungen‘ zugeordnet, jedoch noch nicht in Form von konkreten Funktionen beschrieben werden. Die Überführung der Materialien ist daher nur eine Vorarbeit zur schnelleren Datenerhebung.



HB – Abbildung 9: Systemelement ‚Material‘ als Vorlage mit Funktionskategorien und allen verwendeten Materialien (Beispiel: SCA)

3) Mittelwelt (HB – Abbildung 10)

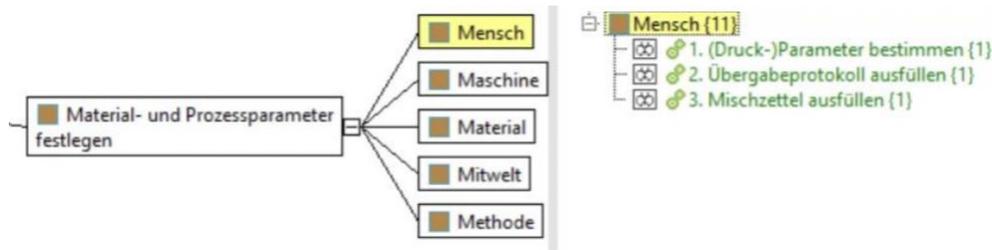
In die Vorlage zum Systemelement ‚Mittelwelt‘ werden die Funktionskategorien ‚Umgebungseinflüsse‘ und ‚Versorgungseinflüsse‘ erstellt sowie die aus dem Arbeitsablaufplan ersichtlich werdenden Einflüsse bzw. Versorgungsungen notiert.



HB – Abbildung 10: Systemelement ‚Mittelwelt‘ als Vorlage mit Funktionskategorien und bestehenden Einflüssen

4) Menschen (HB – Abbildung 11)

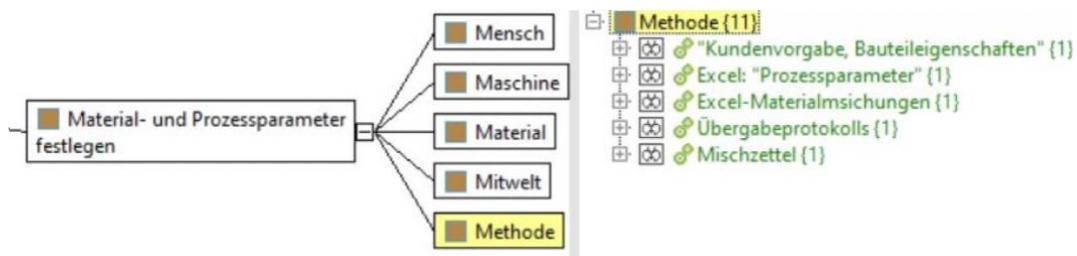
Zum Systemelement ‚Mensch‘ werden die Bezeichnungen der Sub-Arbeitssysteme als ‚Funktionskategorien‘ übernommen. Diese Kategorien geben im weiteren Verlauf der Datenerhebung Anhaltspunkte zu den Funktionen des Menschen. Ein bedeutsamer Vorteil des Vorgehens ist es, dass durch diese Abstrahierung der einzelnen Tätigkeiten aus dem Arbeitsablaufplan eventuell fehlende Tätigkeiten aus dem Arbeitsablaufplan umgangen werden.



HB – Abbildung 11: Systemelement ‚Mensch‘ mit Sub-Arbeitssystemen als Funktionskategorien (Beispiel: SCA)

5) Methode (HB – Abbildung 12)

Zur Methode können die Dokumente (wie bspw. das Übergabeprotokoll, Kriterienkataloge etc.) und auch Tabellen (wie bspw. zu Prozessparametern, Materialmischungen etc.), die im Arbeitsablauf stehen, bereits zur ‚Methode‘ aufgelistet werden. Diese werden – gleich zum ‚Material‘ – jedoch noch nicht in Form von konkreten Funktionen beschrieben.



HB – Abbildung 12: Systemelement ‚Methode‘ mit allen verwendeten Dokumenten und Tabellen (Beispiel: SCA)

Damit sind alle vorbereitenden Arbeiten in der FMEA-Software abgeschlossen und es erfolgen die Workshops mit den Experten mit der iterativen Umsetzung der Schritte PII-3 und PII-4.

Iteration der Schritte PII-3: Funktionen und PII-4: Fehlfunktionen und Fehlernetz

Die Datenerhebung zur Phase II erfolgt über die iterative Umsetzung der Schritte PII-3 und PII-4. Hierüber werden die fehlenden Funktionen sowie Fehlfunktionen mit Fehlernetz gemeinsam mit den Experten erschlossen. Eine konkrete Reihenfolge zur Erhebung ist hierbei nicht vorgegeben – wichtiger ist, dass alle Funktionen und Fehlfunktionen sinngemäß erschlossen und miteinander verknüpft werden. Es empfiehlt sich jedoch, zuerst die Vorlagen zu vervollständigen und daraufhin die jeweiligen Arbeitssysteme zu fokussieren. Die relevanten Fehl-/Funktionen der M-Komponenten werden zum benötigten Zeitpunkt aus den Vorlagen in die entsprechenden M-Komponenten kopiert und eingefügt.

Maschine

Die Funktionen zum Systemelement ‚Maschine‘ wurden bereits in die Vorlage übertragen. Nun gilt es, dessen Fehlfunktionen ab- bzw. herzuleiten. Die einfachste Form der Fehlfunktion ist dabei immer die Negierung der Funktion. Betrachtet man die Funktion genauer, können davon gegebenenfalls ein oder mehrere Fehlfunktionen abgeleitet werden. Ausschlaggebend ist hierbei immer die Formulierung der Funktion bzw. deren enthaltenen Anforderungen. Zur Moderation der Fehlfunktionsherleitung kann wie folgt vorgegangen werden (Funktion in Grün; Fehlfunktion in Rot):

- Das [Maschinenelement] hat die Funktion [Funktion]. Welche mögliche Fehlfunktion kann hierzu festgestellt werden?
- Welche möglichen Fehler und/oder Abweichungen gibt es, dass das [Maschinenelement] nicht die Anforderung [Funktion] erfüllt?

Beispiel zur einfachen Ableitung:

- Fluid-Druckregelung gewährleistet eingestellten Fluiddruck
- Fluid-Druckregelung gewährleistet nicht den eingestellten Fluiddruck

Beispiel zur doppelten Ableitung:

- Druckkopfdüsen applizieren Fluid mit geradem Strahl
- Druckkopfdüsen applizieren Fluid nicht mit geradem Strahl (schief)
- Druckkopfdüsen applizieren Fluid, kein Fluid (verstopft)

Material

Alle Materialien sowie Mischungen wurden bereits aus dem Arbeitsablaufplan entnommen und vorab in der Vorlage in APIS festgehalten. Nun gilt es, die Materialien und Mischungen in Funktionen zu formulieren. Dabei liegt der Fokus auf deren Zustand bzw. Eigenschaften. Dieser sollte sich gewollt bzw. gezielt verändern oder nicht verändern. Ein Beispiel für eine Veränderung wäre das Aushärten eines Klebstoffes. Es kann durchaus vorkommen, dass sich daraus keine Fehlfunktionen ergeben. Dies wird mit der Fehlfunktion ‚keine‘ dokumentiert. Zur Moderation leiten die Fragen (Funktion in Grün; Fehlfunktion in Rot):

- Sind dem [Material] bestimmte Eigenschaften zugewiesen?
- Gibt es definierte Anforderungen an das [Material]?
- Welche Abweichungen gibt es zu der [Funktion/Anforderung]?

Die Wortwahl kann wie folgt dokumentiert werden:

- Material behält definierte Eigenschaften bei (Produktblatt)

Beispiel:

- Materialmischung behält definierte Eigenschaften bei (Granulat)
- Materialmischung behält nicht definierte Eigenschaften bei (agglomeriert)

Mitwelt

Im Systemelement ‚Mitwelt‘ werden alle Umgebungs- und Versorgungseinflüsse (Funktionskategorien der Vorlage) dokumentiert. Die Funktionen zur Mitwelt zielen auf Bedingungen ab, die in unmittelbarer Umgebung des Arbeitsplatzes einzuhalten sind. Mögliche Anhaltspunkte sind hierbei das Umgebungsklima mit Temperatur und Luftfeuchtigkeit sowie die Versorgung mit allen relevanten Anschlüssen des Labors (Strom, Wasser, Druckluft etc.). Da es sich hierbei um eine Vorlage handelt, kann es vorkommen, dass im Erhebungsprozess eine Funktion bzw. Fehlfunktion der Mitwelt nicht vorhanden ist. Diese müssen an entsprechender Stelle ergänzt werden. Leitend sind die Fragen (Funktion in Grün; Fehlfunktion in Rot):

- Welche Umgebungsbedingungen oder Versorgungseinflüsse müssen zum Fertigungsprozess [Arbeitssystem] eingehalten oder sichergestellt werden?
- Welche Abweichungen gibt es zu der [Funktion/Anforderung], die für den Fertigungsprozess [Arbeitssystem] relevant sind?

Beispiel:

- Umgebungsklima nach definierten Laborbedingungen (Temperatur, Luftfeuchtigkeit)
- Umgebungsklima zu kalt
- Umgebungsklima zu feucht

Nachdem die Funktionen und Fehlfunktionen in den Vorlagen erschlossen sind, werden die spezifischen Arbeitssysteme und deren 5M-Prozesseinflüsse fokussiert.

Mensch

Der Mensch wird im System als ‚Komponente/Teil‘ betrachtet. Daher hat der Mensch im Arbeitssystem einen bestimmten Zweck bzw. eine bestimmte Anforderung zu erfüllen. Mit dieser funktionalen Betrachtungsweise des Menschen im System gilt es, alle verwendeten Dokumente, Einweisungen und Anleitungen heranzuziehen und als ein ‚Handeln nach Vorgaben‘ zu beschreiben. Zur Orientierung geben die Funktionskategorien (Sub-Arbeitssysteme) Anhaltspunkte. Leitend sind hierbei folgende Fragen (Funktion in Grün):

- Welchen Zweck erfüllt der Mitarbeitende (MA) in [Arbeitssystem]?
- Welche Anforderungen bestehen an den Mitarbeitenden (MA) in [Arbeitssystem]?
- Nach welchen Regeln oder Vorgaben sind diese Tätigkeiten auszuführen? Bzw. woher weiß der Mitarbeiter, wie er es richtig auszuführen hat?

Beispiele zum Satzbau:

- MA + Tätigkeit (bspw. wiegt) + Substantiv (bspw. Quarzsand) + Anforderung (nach Vorgabe (bspw. Übergabedokument))
- MA + Tätigkeit (bspw. gibt in den Mischer) + Substantiv (bspw. Materialmengen) + Anforderung (in definierter/richtiger Reihenfolge)

Die Fehlfunktionen (rot) des Menschen (siehe HB – Abbildung 13) ergeben sich aus den Negierungen und Abweichungen der Funktion (grün) und können daher ohne Leitfragen mit dem Experten hergeleitet werden.



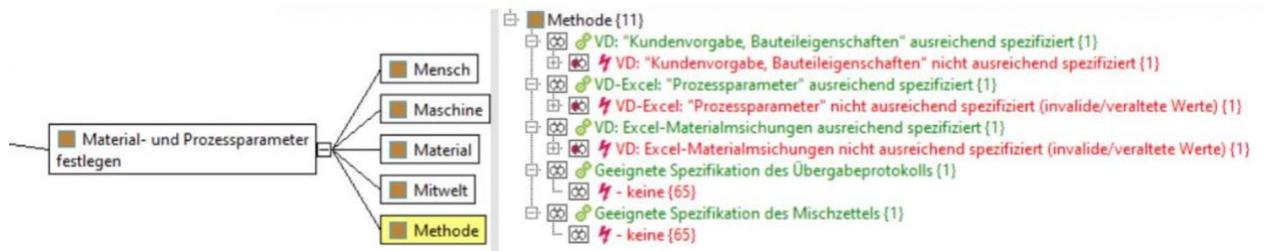
HB – Abbildung 13: Systemelement ‚Mensch‘ mit Funktionen und Fehlfunktion (Beispiel: SCA)

Die in der Funktion enthaltenen Vorgaben oder Definitionen werden in der Methode genauer betrachtet.

Methode

Da der Mensch seine Tätigkeit korrekt nach Vorgabe ausführen kann, jedoch die Vorgabe fehlerhaft sein kann, wird diese Fehlermöglichkeit im Rahmen der Methode aufgegriffen. Ziel des Systemelements ‚Methode‘ ist es, alle Spezifikationen aus den Vorgaben zu fokussieren, das bedeutet, die in den Klammern genannten Dokumente wie Kriterienkataloge, Anleitungen oder

auch Tabellen etc. Hierzu werden deren Funktionen (grün) erstellt und als Negation die Fehlfunktion (rot) abgeleitet (HB – Abbildung 14).



HB – Abbildung 14: Systemelement ‚Methode‘ mit Funktionen und Fehlfunktion (Beispiel: SCA)

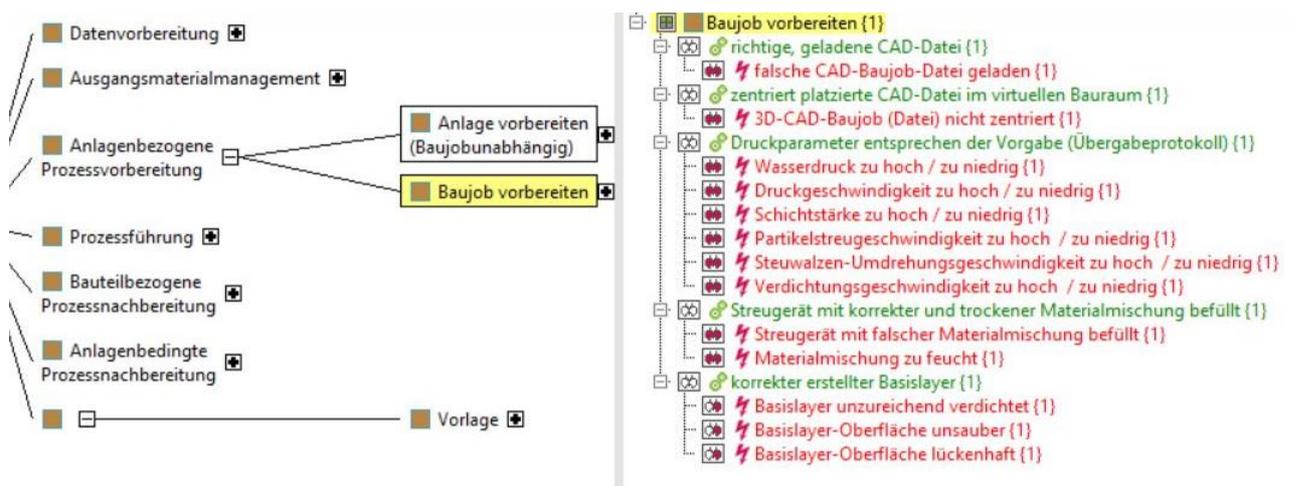
Möglicher Satzbau der Funktionen (grün) und Fehlfunktionen (rot):

- [Methodenelement] + ausreichend spezifiziert.
- [Methodenelement] + nicht ausreichend/unzureichend spezifiziert.

Arbeitssysteme

Im Rahmen der Schritte PII-3 und PII-4 gilt es – auf Arbeitssystemebene – die Anforderungen an die Outputs zu erschließen und davon ausgehend zugleich deren mögliche Fehlerzustände (HB – Abbildung 15) herzuleiten. Hierzu leiten bei der Moderation die Fragen (Funktion in Grün; Fehlfunktion in Rot):

- Welche Anforderungen bestehen an den [Output]?
- Welche Eigenschaften muss der [Output] aufweisen?
- Welche möglichen Abweichungen gibt es zu dieser Funktion/Anforderung bzw. diesem Zustand?



HB – Abbildung 15: Systemelemente ‚Baujob vorbereiten‘ mit Funktionen und Fehlfunktionen (Beispiel: SCA)

Hierbei ist darauf zu achten, dass aufgrund der Erhebung zu den Prozessauswirkungen die Fehlfunktionen je nach Auswirkung auf den Prozess gegebenenfalls ausdifferenziert werden müssen – bspw. zu hoch oder zu niedrig. Die Ursachen können in beiden Fällen gleich sein.

Prozessauswirkung

Im Zuge der Erschließung der Fehlfunktionen des Arbeitssystems können weiter die damit einhergehenden Fehlfunktionen der Prozessauswirkung erschlossen und den vorgegebenen Kategorien zugeordnet werden (HB – Abbildung 16). Zu den Prozessauswirkungen gilt es daher, die Kausalitäten des Fehlers zu dokumentieren und erweiterte Erklärungen zu erhalten. Hierbei leiten die Fragen:

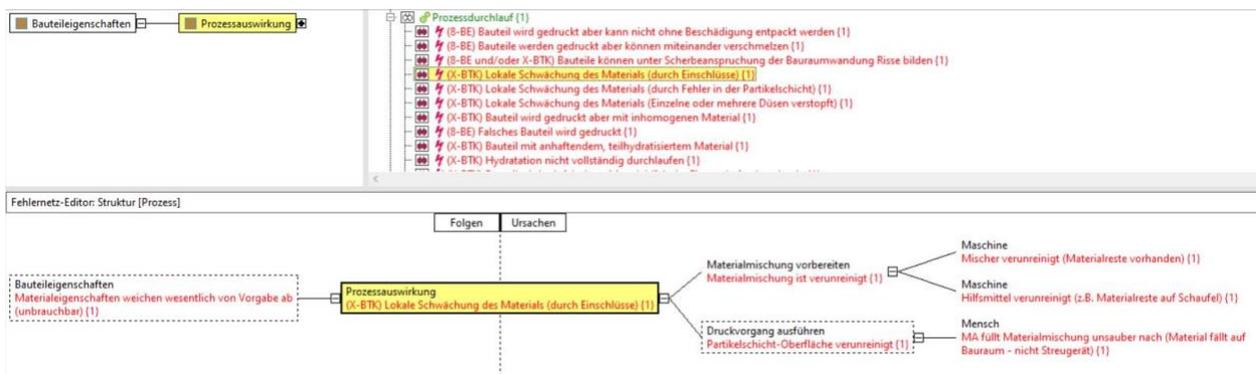
- Was wäre, wenn [*Fehlfunktion Arbeitssystem*] eintritt? oder
- Was geschieht im Prozess, wenn [*Fehlfunktion Arbeitssystem*] eintritt?



HB – Abbildung 16: Systemelement ‚Prozessauswirkung‘ mit Fehlfunktionen (Beispiel: SCA)

Fehlernetz

Mitunter einer der wichtigsten Teile der FMEA ist das Fehlernetz. Für die beiden Untersuchungsgebiete der Fehlerfolge (Prozessauswirkung und Bauteileigenschaften) sowie Fehlerursache (5M-Prozesseinflüsse) gilt es, nur die relevanten bzw. zutreffenden Fehlfunktionen auszuwählen und miteinander zu verbinden. Eine Auswirkung auf die Bauteileigenschaften kann demnach nur stattfinden, wenn die Fehlfunktion der Prozessauswirkung im Prozessdurchlauf zugeordnet ist (HB – Abbildung 17). Das Vorgehen zur Erstellung des Fehlfunktionsnetzes wird ebenfalls für alle Fehlfunktionen des jeweiligen Arbeitssystems durchgeführt. Dabei kann es vorkommen, dass Fehlfunktionen unterschiedlicher Arbeitssysteme eine gleiche Prozessauswirkung hervorrufen und sich dadurch Überschneidungen ergeben.



HB – Abbildung 17: Fehlernetz (Beispiel: SCA)

Schritt PII-5: Vermeidungs- und Entdeckungsmaßnahmen mit Risikobewertung

Da der Prozessabbruch und die Prozesspause nicht weiter mit den Bauteileigenschaften verknüpft werden, gilt es, deren Bewertung zur Bedeutung festzulegen. Die Fehlfunktionen des Prozessabbruches werden mit $B = 7$ und die der Prozesspause mit $B = 5$ versehen.

Die Fehlfunktionsnetze werden von der FMEA-Software in entsprechende FMEA-Formblätter (HB – Tabelle 5) zu den Arbeitssystemen überführt. Die Fehlerfolgen aus Prozessauswirkung und Bauteileigenschaften mit deren Bedeutung befinden sich in den Spalten 1 und 2, die Fehlerart in Spalte 3, die Fehlerursache in Spalte 4. Mit Schritt PII-5 gilt es jeweils deren Vermeidungsmaßnahme mit Auftretenswahrscheinlichkeit in den Spalten 5 und 6 und Entdeckungsmaßnahmen mit Entdeckungswahrscheinlichkeit in den Spalten 7 und 8 einzutragen. Die Risikoprioritätszahl (PRZ) und die Aufgabenpriorität (AP) in den Spalten 9 und 10 werden von der FMEA-Software automatisch errechnet.

HB – Tabelle 5: Exemplarische Darstellung des Aufbaus zur tabellarischen Dokumentation der Daten entlang des FMEA-Formblattes

Fehlerfolge	B	Fehlerart	Fehlerursache	Vermeidungsmaßnahme	A	Entdeckungsmaßnahme	E	RPZ	AP	V/T
Systemelement: [X] Arbeitssystem										
Funktion: Funktion Arbeitssystem										
[Prozessauswirkung] Fehlfunktion Prozessauswirkung	7	Fehlfunktion Arbeitssystem	[Mensch] Fehlfunktion Mensch	Maßnahmenstand - Anfang: 15.12.2023 [Vermeidungsmaßnahme]		[Entdeckungsmaßnahme]				
[Bauteileanforderungen] Fehlfunktion Bauteilanforderung			[Maschine] Fehlfunktion Maschine	Maßnahmenstand - Anfang: 15.12.2023 [Vermeidungsmaßnahme]		[Entdeckungsmaßnahme]				
			[Material] Fehlfunktion Material	Maßnahmenstand - Anfang: 15.12.2023 [Vermeidungsmaßnahme]		[Entdeckungsmaßnahme]				
			[Mittel] Fehlfunktion Mittel	Maßnahmenstand - Anfang: 15.12.2023 [Vermeidungsmaßnahme]		[Entdeckungsmaßnahme]				
			[Methode] Fehlfunktion Methode	Maßnahmenstand - Anfang: 15.12.2023 [Vermeidungsmaßnahme]		[Entdeckungsmaßnahme]				
					[Vermeidungsmaßnahme Optimierung]		[Entdeckungsmaßnahme Optimierung]			
					[Vermeidungsmaßnahme Optimierung]		[Entdeckungsmaßnahme Optimierung]			
					[Vermeidungsmaßnahme Optimierung]		[Entdeckungsmaßnahme Optimierung]			
					[Vermeidungsmaßnahme Optimierung]		[Entdeckungsmaßnahme Optimierung]			
					[Vermeidungsmaßnahme Optimierung]		[Entdeckungsmaßnahme Optimierung]			
					[Vermeidungsmaßnahme Optimierung]		[Entdeckungsmaßnahme Optimierung]			

Zur Moderation der Erschließung der Vermeidungsmaßnahmen leiten die Fragen:

- o Welche Maßnahmen werden aktuell umgesetzt, damit die [Fehlerursache] nicht eintritt?
- o Wie wird sichergestellt, dass die [Fehlerursache] nicht eintritt?

Die Bewertung dieser Maßnahmen wird entlang der Risikobewertung zur Auftretenswahrscheinlichkeit (HB – Tabelle 6) durchgeführt. Sollte der Experte jedoch in Einzelfällen eine kritischere Bewertung vorsehen, wird diese dokumentiert.

HB – Tabelle 6: Risikobewertung zur Auftretenswahrscheinlichkeit der Vermeidungsmaßnahmen

Katalog der Risikobewertung: Auftreten Ursache				
Bewertung		Bedeutung	Vermeidungsmaßnahme	Anmerkung
N	1	Sehr effektiv	Fehler kann praktisch nicht auftreten	Technisch: Automatisierte Steuerung / Regelung Verhalten: Protokollierte Kontrolle durch Dritte Methode: Etabliertes Verfahren (keine Negativbeispiele bekannt, nachweislich geeignet)
M	3	Effektiv	Fehler kann nur selten auftreten	Technisch: Regelmäßige Wartung der Maschine, geringer Beteiligung des Menschen; Automatisierte Abläufe die noch schief laufen können (z.B. Reinigungsbürste der Maschine) Verhalten: Handeln nach etablierten/ standardisierten Verfahren (z.B. DIN); Kontrolle nach DIN-Vorgaben; Ausführung anhand Step-By-Step Anleitung (protokolliert) Methode: Verfahren ist geeignet (jedoch nicht standardisiert)
M	5	Mäßig	Fehlerauftreten kann gelegentlich auftreten	Technisch: keine Verhalten: spezifische Schulung zum Prozessschritt Ablaufprotokoll / Anleitung / Übergabedokumente in unmittelbarer Nähe (keine Protokollierung) Methode: Verfahren ist geeignet (andere eventuell besser geeignet)
H	7	Uneffektiv	Fehler kann häufig auftreten	Technisch: keine Verhalten: Allgemeine, unspezifische Schulung, Einweisung etc. Methode: Verfahren unerprobt, wirkt ab und zu.
H	10	Keine	Fehler kann immer auftreten	Technisch: keine Verhalten: "learning by doing" Methode: keine, Verfahren gibt es nicht

Für die Erschließung der Entdeckungsmaßnahmen leiten die Fragen:

- Welche Maßnahmen werden aktuell umgesetzt, um die [*Fehlerursache*] zu entdecken?
- Wie wird die [*Fehlerursache*] entdeckt, wenn diese eintritt?

Die Bewertung der Entdeckungsmaßnahmen erfolgt ebenfalls entlang der Risikobewertung (HB – Tabelle 7). Sollte hierbei der Experte ebenfalls in Einzelfällen eine kritischere Bewertung vorsehen, wird diese dokumentiert. Nach deren Eingabe wird unmittelbar von der FMEA-Software die Risikoprioritätszahl (RPZ) errechnet. Je höher dabei der RPZ-Wert ist, desto kritischer ist der Fehler im Arbeitssystem. Die Aussagekräftigkeit der RPZ ist jedoch umstritten. Daher wird zusätzlich die Aufgabenpriorität (AP) mit ‚Hoch‘, ‚Mittel‘ oder ‚Niedrig‘ berechnet. Je dringlicher die Aufgabenpriorität, umso dringlicher sollten entsprechende Optimierungsmaßnahmen erfolgen.

HB – Tabelle 7: Risikobewertung zur Entdeckungswahrscheinlichkeit der Entdeckungsmaßnahmen

Katalog der Risikobewertung: Entdeckung Ursache				
Bewertung		Bedeutung	Entdeckungsmaßnahme	Anmerkung
N	1	Sehr effektiv	Automatisiert	Sensorik erkennt Fehler, Automatischer Prozessstopp Prozess unterbrochen mit Warnhinweis <i>Fehler wird immer entdeckt</i>
M	3	Effektiv	Halbautomatisiert	Sensorik erkennt Fehler Maschine oder Mensch muss handeln bzw. eingreifen <i>Wahrscheinlichkeit hoch</i>
M	5	Mäßig	Nach Kontrolle	Entdeckung durch Mensch, regelmäßig / routinemäßig <i>Wahrscheinlichkeit mittel</i>
H	7	Uneffektiv	Bei Gelegenheit	Entdeckung durch Mensch, Stichprobenartig / bei Gelegenheit <i>Wahrscheinlichkeit niedrig</i>
H	10	Keine	Keine	Keine Möglichkeit den Fehler zu entdecken <i>Fehler wird nicht entdeckt</i>

Schritt PII-6: Optimierung (optional)

Zu Schritt PII-6 können bereits Optimierungen aufgenommen und dokumentiert werden. Diese werden entsprechend in den Zeilen darunter notiert und in Spalte 11 jeweils mit einer Verantwortlichkeit (V) und Fälligkeit (T) versehen (HB – Tabelle 5). Dieser Schritt ist jedoch Teil der Weiterführung zur FMEA, kein Bestandteil der folgenden Kompetenzanalyse/-generierung und daher optional. Die Maßnahmen zur Verbesserung (HB – Abbildung 18) können ebenfalls direkt in das FMEA-Formblatt eingetragen und mit der zu erwartenden Auftretens- und/oder Entdeckungswahrscheinlichkeit hinterlegt werden. Hierzu werden entsprechende Fälligkeiten sowie Verantwortlichkeiten an Personen übertragen und zum gegebenen Zeitpunkt die tatsächlichen Ergebnisse eingetragen.

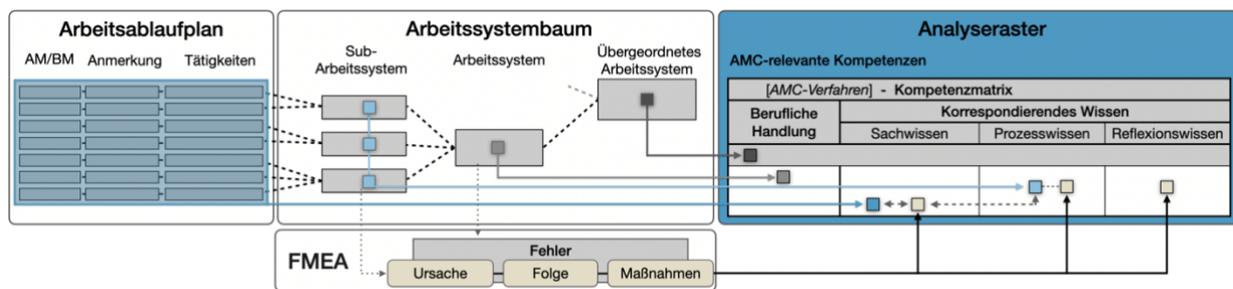
Maßnahmen zur Optimierung	Auftretenswahrscheinlichkeit (erwartet)	Entdeckungswahrscheinlichkeit (erwartet)	Verantwortlichkeit	Termin
[Maschine] Streuwalze streut zu geringe Menge an Partikel	Maßnahmenstand - Anfang: 06.10.2022 keine	7	Sichtbare Lücken im Partikelbett	5 245 H
	Maßnahmenstand: 10.11.2022			
	Messung des Partikelgewichts im Bau- raum	(1)	Sichtbare Lücken im Partikelbett, Soll- Ist-Abgleich des Partikelgewichts -> Feh- lermeldung	(1) (7) (N) Talke, Daniel 16.01.2023 in Umsetzung
[Methode] Unzureichende Spezifikation der Labor- bedingungen (Luftfeuchtigkeit)	Maßnahmenstand - Anfang: 31.10.2022 keine	7	keine	7 343 H
	Maßnahmenstand: 10.11.2022			
	Feuchtigkeitstoleranzen der Laborbedin- gungen erproben, in der Anleitung zum Drucker dokumentieren und Schritt zur Sichtprüfung des Hygroskops vor Druck- beginn ergänzen	(1)	Schichtprüfung des Hygroskops vor Druckbeginn	(5) (35) (N) Talke, Daniel 25.11.2022 in Umsetzung

HB – Abbildung 18: Maßnahmen zur Optimierung sowie erwartete Auftretens- und Entdeckungswahrscheinlichkeiten mit Fälligkeiten und Verantwortlichkeiten

Das FMEA-Formblatt ist ein ‚lebendes Dokument‘, welches stetig weitergeführt werden kann und die Prozesse bzw. die Arbeitssysteme durchgängig optimiert und weiterführt.

5 Phase III: Kompetenzanalyse/-generierung

Ziel der Phase III ist die Analyse und Generierung AMC-relevanter Kompetenzen aus der empirischen Datenbasis der Phasen I und II. Hierzu folgt eine strukturierte Überführung (HB – Abbildung 19) der erhobenen Daten aus dem Arbeitssystembaum, dem Arbeitsablaufplan und der FMEA sowie damit verbunden die Diagnostik der handlungsdeterminierenden Dispositionen. Das Analyseraster AMC-relevanter Kompetenzen greift hierzu die fundierte fachlich-methodische Kompetenzmatrix auf und wird jeweils zu einem Fertigungsverfahren erstellt. Die Matrix wird über die übergeordneten Arbeitssysteme, also entlang der DIN SPEC 17071, vorstrukturiert und die Arbeitssysteme in berufliche Handlungen überführt. Das Sachwissen, also das Wissen über Gegenstände, Werkzeuge etc., entstammt primär dem Arbeitsablaufplan und wird mit den Daten der FMEA abgeglichen bzw. angereichert. Das Prozesswissen, also das Wissen über berufliche Handlungssequenzen, wird insbesondere aus den Sub-Arbeitssystemen überführt und mit den FMEA-Funktionen des Menschen ergänzt. Die Verständniszusammenhänge des Reflexionswissens werden aus dem Fehlernetz mit dessen Ursachen und Folgen hergeleitet und stammen daher nur aus der FMEA.



HB – Abbildung 19: Analyse AMC-relevanter Kompetenzen

Ausgehend von den eben dargestellten, rahmenden Bezügen erfolgt die konkrete Analyse und Generierung der Teilkompetenzen in die AMC-Kompetenzmatrix (HB – Tabelle 8) über insgesamt zehn Schritte:

Schritt PIII-1: Benennung der Kompetenzmatrix

Da die Kompetenzmatrix für ein Fertigungsverfahren erstellt wird, wird die Bezeichnung des Fertigungsverfahrens in die erste Zeile eingetragen.

Schritt PIII-2: Vorstrukturierung entlang der DIN SPEC 17071:2019

Als Nächstes werden die übergeordneten Arbeitssysteme, also die ‚relevanten Bereiche‘ der DIN SPEC 17071:2019 in deren Abfolge in die dafür vorgesehenen Zeilen eingetragen und die Kompetenzmatrix dadurch vorstrukturiert.

Schritt PIII-3: Überführung der Arbeitssysteme in berufliche Handlungen

Über Schritt PIII-3 werden die Arbeitssysteme in deren Abfolge und Zuordnungen zur DIN in berufliche Handlungen überführt und dabei sprachlich umformuliert. Als Beispiel: Das Arbeitssystem ‚Baujob vorbereiten‘ wird als ‚Die Fachkraft [...] bereitet den Baujob vor.‘ in die

Matrix (Spalte 1) eingetragen. Diese Überführung und Umformulierung erfolgt mit jedem Arbeitssystem des Arbeitssystembaums.

HB – Tabelle 8: Kompetenzmatrix AMC-relevanter Kompetenzen

Fertigungsverfahren	Korrespondierendes Wissen		
Berufliche Handlung <i>Die Fachkraft...</i>	Sachwissen	Prozesswissen	Reflexionswissen
[Relevanter Bereich aus DIN SPEC 17071:2019]			
... [Arbeitssystem]	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Anlagenelemente: <ul style="list-style-type: none"> • ... ▪ Werkzeuge: <ul style="list-style-type: none"> • ... ▪ Hilfsmittel: <ul style="list-style-type: none"> • ... ▪ Materialarten/-eigenschaften: <ul style="list-style-type: none"> • ... ▪ Umgebungsanforderungen: <ul style="list-style-type: none"> • ... ▪ Externe Anschlüsse/Versorgung: <ul style="list-style-type: none"> • ... ▪ ... [FMEA-Methode] <ul style="list-style-type: none"> • ... 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ [Sub-Arbeitssystem] <ul style="list-style-type: none"> • [Funktion] • [Funktion] • ... ▪ ... <ul style="list-style-type: none"> • ... 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ [Fehlernetz zur Fehlerart im Arbeitssystem] ▪ ...

Mit den iterativen Schritten PIII-4 bis PIII-10 gilt es, das korrespondierende, kompetenzrelevante Wissen zu den jeweiligen beruflichen Handlungen zu analysieren. Die folgenden Schritte beziehen sich daher unmittelbar auf ein Arbeitssystem. „Bisherige Erfahrungen haben gezeigt, dass sich der Beginn mit dem Prozesswissen leichter darstellt, da dieses in unmittelbarem Bezug zur beruflichen Handlung steht und sich aus diesem ableiten lässt. Das Prozesswissen ist dabei ein anwendungs- und umsetzungsabhängiges Wissen über berufliche Handlungssequenzen, konkrete berufliche Prozesse sowie Abläufe“ (Pittich, 2023, S. 18). Gleiches gilt für das Prozesswissen der vorliegenden Analyse.

Schritt PIII-4: Explikation des Prozesswissens – Arbeitssystembaum

Die Sub-Arbeitssysteme eines Arbeitssystems stellen in diesem Fall eine erste Gliederung der beruflichen Handlungssequenzen dar und werden über Schritt 4 in das Prozesswissen überführt. Hierbei ist wichtig, dass diese ‚Teilhandlungen‘ in entsprechende Kognitionen expliziert werden. Dies bedeutet exemplarisch, dass das Sub-Arbeitssystem ‚Baujobbezogene Daten einstellen‘ in die Kognition ‚Einstellung baujobbezogener Daten‘ überführt und in die Spalte zum

Prozesswissen eingetragen wird. Mit dieser Logik wird daher nicht mehr das ‚Einstellen‘ (Tun) fokussiert, sondern die ‚Einstellung‘ (Wissensaspekt). Für diese Überführung in Kognitionen ist die Verwendung der Formulierungssammlung (HB – Tabelle 9) hilfreich. Gleiches wird für die weiteren Sub-Arbeitssysteme des Arbeitssystems vorgenommen.

HB – Tabelle 9: Formulierungssammlung zu Prozesswissensaspekten

Konstruktion von	Reinigung/ Säuberung von	Erstellung / Anfertigung	Ausgrabung von	Bereitstellung von
Anordnung von	Beobachtung/ Überwachung	Berechnung / Ermittlung	Beschriftung von	Um-/Abfüllung von
Import von	Übertragung	Eingabe	Schmierung	Mischung von
Export von	Prüfung	Erstellung	Wartung	Öffnung von
Herstellung	Durchführung von	Befüllung	Bestimmung	Festlegung
Lagerung von	Nachfüllung	Ausführung	Einstellung	Sicherstellung
Zugeben von	Positionierung	Erneuerung	Nachbereitung (von) (z.B. Leeren, Abfüllen)	Vorbereitung (nur zweite Ebene Abwiegen)
Einrichtung (z.B. Starten, ...)	Nachbehandlung von (z.B. Wässern, ...)	Organisation (z.B. Einräumen des Lagers)		

Schritt PIII-5: Ergänzungen zum Prozesswissen – FMEA

Im nächsten Schritt 5 wird die FMEA zur Ergänzung des Prozesswissens herangezogen. Hierzu werden die Funktionen des Menschen zum jeweiligen Arbeitssystem betrachtet. Da die Sub-Arbeitssysteme die Funktionskategorien darstellen und diese aus dem Arbeitssystembaum bereits in die Kompetenzmatrix übernommen wurden, werden die spezifischen Funktionen des Menschen innerhalb dieser Funktionskategorien als Unterpunkte des jeweiligen Prozesswissens überführt (HB – Tabelle 8). Beispielsweise wird die Funktion ‚MA legt Mischverhältnisse der Einzelmaterialien fest (nach Vorgabe zur Materialmischung)‘ in den Unterpunkt ‚Festlegung der Mischverhältnisse‘ überführt. Zudem gelten folgende, erweiterte Grundsätze:

- Anforderungs-, druck- oder bedarfsspezifische Spezifikationen sowie Vorgaben werden nicht übernommen.
- Funktionen, die in der FMEA mehrmals auftauchen oder als Verweise zu anderen Arbeitssystemen dokumentiert worden sind, werden in allen Fällen ebenfalls als Prozesswissen zur beruflichen Handlung übernommen bzw. aus dem entsprechenden Prozesswissen kopiert und an vorgesehener Stelle eingefügt. Weiteres erfordert jedoch eine logische Übernahme bzw. kann mit Korrekturanpassungen verbunden sein, da beispielsweise die ‚Beschriftung von Einzelmaterialien und Materialmischungen‘ im Ausgangsmaterialmanagement erfolgt sowie auch bei der ‚Abfüllung der Materialmischung‘. Hier muss dabei logischerweise der Teil ‚Einzelmaterialien und‘ rausgenommen werden.
- Sollte eine der Funktionen der FMEA gleich zur Funktionskategorie sein und damit gleich der Formulierung zum Aufzählungspunkt des Prozesswissens, wird für diesen Aufzählungspunkt

der ersten Ebene eine andere, übergreifende Begrifflichkeit aus der Formulierungssammlung gewählt.

Schritt PIII-6: Explikation der Sachwissensaspekte – Arbeitsablaufplan

In Schritt PIII-6 wird das Sachwissen, also das anwendungs- und umsetzungsunabhängige Wissen über Gegenstände, Werkzeuge etc. aus dem Arbeitsablaufplan, in die Kompetenzmatrix überführt. Hierzu werden über Schritt 7 alle Arbeits-/Betriebs- und Hilfsmittel zum jeweiligen Arbeitssystem übertragen. Erste Ebene bilden dabei die Gruppierungen „Anlagenelemente“, „Werkzeuge“ und „Hilfsmittel“ (siehe HB – Tabelle 8). Auf zweiter Ebene erfolgt die Auflistung der jeweiligen Elemente aus dem Arbeitsablaufplan. Die Gruppierungen können bei Bedarf noch spezifiziert (z. B. Misch- und Wiegehilfsmittel) werden.

Schritt PIII-7: Ergänzung der Sachwissensaspekte – FMEA

Mit Schritt PIII-7 wird das Sachwissen zur beruflichen Handlung aus den jeweiligen Arbeitssystemdaten der FMEA in folgender Reihenfolge angereichert:

- Maschine: Zunächst werden die eben dokumentierten Anlagenelemente, Werkzeuge und Hilfsmittel mit den in der FMEA dokumentierten Funktionen abgeglichen und mit den fehlenden Elementen angereichert. Dabei werden die Informationen aus den (Fehl-)Funktionen im Nominalstil ergänzt.
- Methode: Da die FMEA so strukturiert ist, dass der Mensch in den meisten Fällen ‚nach Vorgabe‘ arbeitet, werden im nächsten Schritt die Vorgaben, die im Rahmen der Methode spezifiziert wurden, als Aufzählungen erster Ebene dokumentiert (siehe HB – Tabelle 8). Sollten die Methoden bereits in einer Unterebene aufgelistet sein, werden diese in die erste Ebene überführt.
- Material: Weiter werden die Materialien zum Sachwissen ergänzt. Hierfür wird auf erster Ebene die Gruppierung „Materialarten/-eigenschaften“ ergänzt (siehe HB – Tabelle 8) und auf zweiter Ebene die Materialien aufgelistet. Sollten keine Materialien vorhanden sein, wird die Gruppierungsvorlage gelöscht.
- Mitwelt: Zu den Umgebungs- und Versorgungseinflüssen wird auf erster Ebene zum Sachwissen die Gruppierung „Umgebungsanforderungen“ für die Umgebungseinflüsse und ‚Externe Anschlüsse/ Versorgung‘ für die Versorgungseinflüsse erstellt (siehe HB – Tabelle 8) sowie die enthaltenen Elemente auf zweiter Ebene übertragen. Sollten keine Elemente zur Mitwelt vorhanden sein, wird die Gruppierungsvorlage gelöscht.
- Mensch: Weiter erfolgt die Ergänzung der Informationen aus den Funktionen und Fehlfunktionen des Ursachenelements ‚Mensch‘. Dies betrifft insbesondere eine Konkretisierung der bereits festgehaltenen Methoden-Spezifikationen (erste Ebene). Die enthaltenen, relevanten Daten werden hierzu auf zweiter und/oder dritter Ebene – je nach logischer Bündelung bzw. Zusammenfassung – ergänzt.
- Arbeitssystem: Zudem wird das Sachwissen mit relevanten Informationen bzw. Anforderungen aus den (Fehl-)Funktionen des Arbeitssystems selbst angereichert. Hierzu

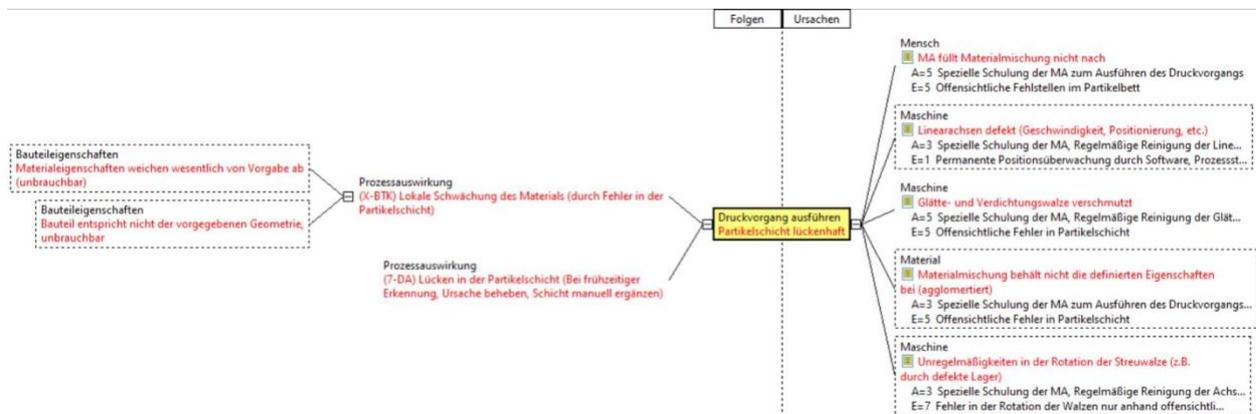
sollte die Erstellung einer ersten Ebene nicht mehr notwendig sein, vielmehr sind hier die bereits dokumentierten Ebenen abzugleichen und gegebenenfalls zu ergänzen.

Schritt PIII-8: Ergänzung der Sachwissensaspekte – Arbeitsablaufplan

Abschließend zum Sachwissen werden über Schritt PIII-8 letzte Ergänzungen aus den Haupttätigkeiten des Arbeitsablaufplans vorgenommen. Hierin können noch zusätzliche Daten, wie beispielsweise Parameter, aufgelistet sein, die den entsprechenden Gruppierungen hinzugefügt werden.

Schritt PIII-9: Explikation der Reflexionswissensaspekte – Fehlernetz

Schließlich gilt es, über Schritt PIII-9 das Reflexionswissen zu explizieren. Hierfür wird das Fehlernetz der FMEA (HB – Abbildung 20) bezüglich der Fehlerarten, Prozess- und Bauteilwirkungen sowie der Ursachen untersucht. Fokuselement des Fehlfunktionsnetzes sind die Arbeitssystem-Fehlfunktionen.



HB – Abbildung 20: Exemplarisches Fehlernetz mit Fokuselement auf der Arbeitssystem-Fehlfunktion

Die Verständniszusammenhänge des Reflexionswissens ergeben sich dabei über ableitbare Zusammenhänge, die ebenfalls von einer Formulierungssammlung (HB – Tabelle 10) begleitet werden. Aus dem Fehlernetz (HB – Abbildung 20) geht hervor, dass der Mensch, die Maschinenkomponenten und auch das Material Einflüsse auf die Partikelschicht haben und sich dies in Form einer lokalen Schwächung des Materials auf das Bauteil auswirkt. Verallgemeinert bedeutet dies, dass die Fehlerarten einerseits zu ihren Ursachen und andererseits zu ihren Prozessauswirkungen analysiert werden. Zudem werden Fehlfunktionen, die die gleichen Auswirkungen haben, als ein Aufzählungspunkt zusammengefasst und können hierbei in Klammern nach deren Spezifika expliziert werden.

HB – Tabelle 10: Formulierungssammlung zu Reflexionswissensaspekten

Besonderheit	Risiko / Risiken	Funktionsweise von
Abgrenzung	Erweiterte Verständnisse	Prinzip
Zusammenhang (<i>verbindet Ursache Fehler und Folge</i>)	Zusammenspiel (<i>verbindet Ursache Fehler und Folge</i>)	Notwendigkeit (<i>verbindet Ursache Fehler und Folge</i>)
Sorgfältigkeit (<i>nur wenn Mensch und/oder Methode Ursachen sind</i>)	Ursachen und Folgen (<i>insb. bei einer Vielzahl von Ursachen</i>)	Einfluss (<i>Einflüsse</i>) (<i>insb. bei einer Vielzahl von Ursachen</i>)
Auswirkung (<i>kann auch von Ursache über Fehlerart zur Folge führen, ‚und‘ als Verbindung bei gleicher M-Ursache</i>)		Abhängigkeit

Schritt PIII-10: Revision

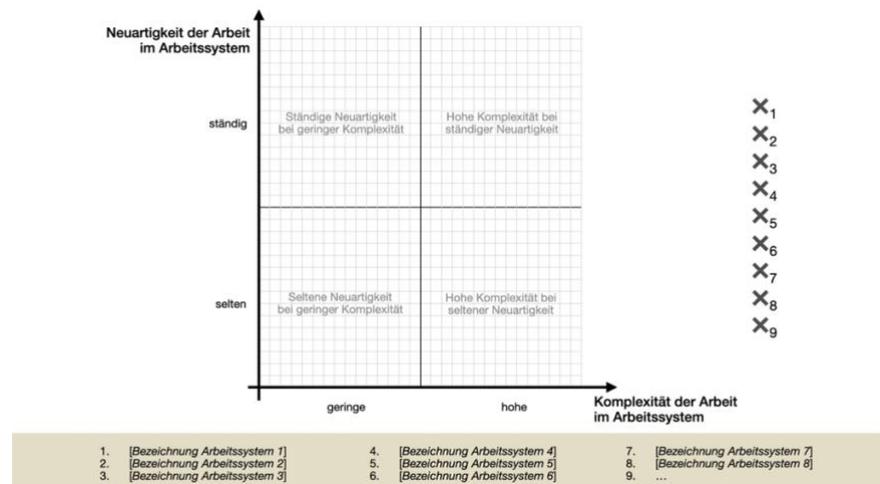
Abschließend wird mit Schritt PIII-10 eine Revision der Teilkompetenz in der Matrix durchgeführt. Hierbei wird insbesondere überprüft, ob zum Prozesswissen auch relevantes Sachwissen und umgekehrt vorhanden ist bzw. sich diese konsequent aufeinander beziehen. Das Reflexionswissen sollte dabei Zusammenhänge und vertiefende Verständnisse zur beruflichen Handlung aufzeigen. Sollten hierbei Schwachstellen zu erkennen sein, müssen entsprechende Schritte nochmals ausgeführt werden.

6 Phase IV: Wissensarbeit und Informationsverarbeitung

Ziel der Phase IV ist es, den Grad an potenziell enthaltener Wissensarbeit in den Arbeitssystemen sowie die Informationsmärkte der Informationsgenerierung und Kontextfaktoren der Informationsnutzbarmachung zur Sicherung der operativen Handlungsfähigkeit zu erschließen. Hierzu erfolgt nach der Vorbereitung von Vorlagen (Schritt PIV-1) die Erhebung mit den beteiligten Experten. Diese gliedert sich in die Gradbestimmung der Wissensarbeit (Schritt PIV-2), die Festlegung der Arbeitssysteme zum Auftreten der Fehlfunktionen zur Prozessauswirkung (Schritt PIV-3) und in die Dokumentation der Informationsmärkte zu den Fehlfunktionen im Ursachengebiet (Schritt PIV-4). Abschließend werden die Daten im Fehlerkatalog zusammengeführt (Schritt PIV-5).

Schritt PIV-1: Vorbereitung der Vierfeldertafel zur Wissensarbeit

Mit dem ersten Schritt zur Phase IV wird für die Bestimmung des Grades an potenziell enthaltener Wissensarbeit eine Präsentationsfolie (HB – Abbildung 21) mit der Vierfeldertafel, den nummerierten Arbeitssystembezeichnungen und einer entsprechenden Anzahl an Kreuzen vorbereitet.



HB – Abbildung 21: Schematische Darstellung der vorbereiteten Präsentationsfolie zur Erschließung des Grades der enthaltenen Wissensarbeit im Soll- und Fehlzustand eines Arbeitssystems

Schritt PIV-2: Einschätzung zur Wissensarbeit in Arbeitssystemen

Mit Schritt PIV-2 wird daraufhin in einem (virtuellen) Meeting gemeinsam mit dem Experten dessen Einschätzung zur Neuartigkeit und Komplexität der Arbeit in den jeweiligen Arbeitssystemen dokumentiert. Hierzu werden die Kreuze entlang der Leitfrage auf den entsprechenden Achsen platziert:

- Wie schätzen Sie die Neuartigkeit und Komplexität der Arbeit in dem [Arbeitssystem] ein?

Bei Unsicherheit des Experten wird die Moderation weitergeführt und nochmals die thematischen Bezüge zur Neuartigkeit und Komplexität erklärt, ohne dabei eine Wertung bzw. einen Meinungseinfluss hervorzurufen. Bei weiterer Unsicherheit wird der komplexeste bzw. neuartigste Fall festgehalten. Diese Leitfrage wird zu jedem Arbeitssystem und zu setzendem Kreuz gestellt. Abschließend erfolgt eine Revision der gesetzten Kreuze unter Bezug auf deren Relationen zueinander:

- Sind die Einschätzungen zu [Arbeitssystem X] und [Arbeitssystem Y] in deren Verhältnis stimmig?
- Ist die Arbeit in [Arbeitssystem Y] ähnlich komplex/neuartig wie in [Arbeitssystem Z]?

Zusätzlich werden der höchste akademische und/oder berufliche Abschluss sowie die Berufserfahrung des Experten notiert.

Schritt PIV-3: Auftreten der Fehlfunktionen der Prozessauswirkung

Im (virtuellen) Meeting können zudem die Fehlfunktionen der Prozessauswirkungen hinsichtlich deren auftretenden Arbeitssysteme identifiziert werden. Das bedeutet, dass dem Experten die erarbeitete FMEA gezeigt wird und hierbei gemeinsam jede Fehlfunktion der Prozessauswirkung mit dem Arbeitssystem vermerkt wird, in dem der Mitarbeitende den Fehler bemerkt bzw. damit konfrontiert wird. Hierbei kann es auch vorkommen, dass ein Fehler erst bei einer Bauteil-Endkontrolle entdeckt wird. Die Moderation wird von der Frage geleitet:

- Wann bzw. in welchem Arbeitssystem wird die [*Fehlfunktion der Prozessauswirkung*] bemerkt?

Das genannte Arbeitssystem oder die genannten Arbeitssysteme – sollte ein Fehler mehrere Möglichkeiten der Entdeckung betreffen – werden an den Anfang der Fehlfunktion geschrieben (vergleiche HB – Abbildung 16).

Schritt PIV-4: Erschließung der Informationsmärkte

Mit anschließendem Schritt PIV-4 gilt es, die Informationsmärkte zu den Fehlfunktionen der Ursachen zu dokumentieren. Hierzu werden zusammen mit den Experten die jeweilige Fehlfunktion der 5M-Ursachenelemente in der FMEA fokussiert und die möglichen Informationsmärkte notiert. Die Moderation zur Erschließung der Informationsmärkte folgt den Fragen:

- Wo kann ich zur [*Ursachenfehlfunktion*] nachschauen/recherchieren? oder
- Wo stehen Informationen zur [*Ursachenfehlfunktion*]? bzw.
- Wen kann oder muss ich hierzu kontaktieren?

Die genannten Informationsmärkte werden in der Software APIS über sogenannte ‚Bemerkungen‘ zu den jeweiligen Fehlfunktionen festgehalten.

Schritt PIV-6: Erstellung des Fehlerkatalogs

Die Daten der FMEA werden mit Schritt PIV-6 materialanalytisch zu einem Fehlerkatalog zusammengetragen. Der Fehlerkatalog ist eine tabellarische Auflistung (HB – Tabelle 11) der Fehlerketten ausgehend von den Fehlfunktionen der Prozessauswirkung (Bezugsproblem – Spalte 1). Für die Nachvollziehbarkeit, woher dieser Fehler kommt (potenziell relevante Informationen), wird das Arbeitssystem mit dessen Fehlfunktion (Fehlerart – Spalte 2 und 3) übertragen. Zudem werden die spezifischen Informationsmärkte, in denen recherchiert werden kann, aus den Bemerkungen übertragen (Spalte 4). Zur Informationsnutzbarmachung werden die Fehlfunktionen der entsprechenden Ursachen als Kontextfaktoren (Spalte 8) notiert. Weiterführende Informationen hierzu liefern die Ursachenelemente (‚Mensch‘, ‚Maschine‘, ‚Material‘, ‚Mittwelt‘, ‚Methode‘ – Spalte 5) sowie die Wahrscheinlichkeiten zum Auftreten (A – Spalte 6) und zur Entdeckung (E – Spalte 7).

HB – Tabelle 11: Fehlerkatalog zu den Fehlfunktionen der Prozessauswirkung mit Informationsmärkten und Kontextfaktoren

Bezugsproblem	Informationsgenerierung			Informationsnutzbarmachung			
	potenziell relevante Informationen			relevant akzeptierte Informationen			
Fehlfunktion Prozessauswirkung	Arbeitssystem	Fehlfunktion	Informationsmärkte	Ursache	A	E	Kontextfaktoren

Das Beispiel (HB – Tabelle 12) zeigt, dass der Mitarbeitende in der Nachbereitung des Bauteils mit möglichen Fehlern aus der Erstellung des 3D-CAD-Modells konfrontiert wird, wenn das Bauteil nicht ohne Beschädigung entpackt werden kann oder sich im Bauteil Risse gebildet haben. Ausschlaggebend und informationsliefernd, woher die Ursache dieses Fehlers kommt, sind dabei primär die Designrules. Darin befinden sich die Kontextfaktoren zu den Konstruktionsbedingungen sowie die Mindestabstände zur Bauteilanordnung. Sollten die Konstruktionsbedingungen eingehalten sein, liegt es an der Methode zur Spezifikation der Designrules, also den darin enthaltenen invaliden Werten. Das bedeutet, dass hier entsprechende Experten, der Druckerhersteller, kontaktiert werden müssen und/oder neue Prüfungen durchgeführt werden müssen. Das Auftreten des Fehlers mit A = 10 zeigt zudem, dass hier keine Vermeidungsmaßnahmen wirken und dieser Fehler dadurch eine hohe Wahrscheinlichkeit besitzt und die Entdeckung mit E = 5 relativ deutlich ist.

HB – Tabelle 12: Auszug aus dem Fehlerkatalog zu 'Bauteil nachbereiten' (Beispiel: SCA)

Bezugsproblem Fehlfunktion Prozessauswirkung	Informationsgenerierung			Informationsnutzbarmachung			
	potenziell relevante Informationen			relevant akzeptierte Informationen			
	Fehler-Arbeitssystem	Fehlfunktion	Informationsmärkte	Ursache	A	E	Kontextfaktoren
Bauteil nachbereiten							
Bauteil wird gedruckt aber kann nicht ohne Beschädigung entpackt werden	3D-CAD-Modell erstellen	3D-CAD-Modell entspricht nicht den Designrules	Designrules	Mensch	7	5	Volumenkörper nicht nach Designrules
			Experten oder Drucker-Hersteller kontaktieren, neue Prüfungen machen	Methode	10	5	Unzureichende Spezifikation der Designrules - Hinterfragen
Bauteile können unter Scherbeanspruchungen der Bauraumwandung Risse bilden	3D-CAD-Modell erstellen	3D-CAD-Baujob entspricht nicht den Designrules (Volumenkörperabstand/ Bauraumwandungabstand)	Designrules	Mensch	5	5	Falsche Bauteilanordnung im virtuellen Bauraum

Kompetenzmatrix: Selective Cement Activation (SCA) – Pilotierung

Fertigungsverfahren	Selektive-Zement-Aktivierung (SCA) – Pilotierung		
Berufliche Handlung <i>Die Fachkraft...</i>	Korrespondierendes Wissen		
	Sachwissen	Prozesswissen	Reflexionswissen
Datenvorbereitung			
<p>... erstellt die 3D-CAD Daten.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 3D-CAD Werkzeuge: <ul style="list-style-type: none"> ○ Computer (für 3D-CAD Anwendungen) ○ 3D-CAD-Software: <ul style="list-style-type: none"> • Konstruktionswerkzeuge • Bearbeitungswerkzeuge ○ Skalierung ○ Dreiecksnetz / Mesh • Feinheits-/Detailierungsgrad • ... ○ Virtueller/realer Bauraum (Größe) • ... ▪ Hilfsmittel-Datenübermittlung: <ul style="list-style-type: none"> ○ Teamviewer ○ USB-Stick ▪ Designrules: <ul style="list-style-type: none"> ○ Volumenkörper ○ 3D-CAD-Modell-Mesh (Löcher / nicht geschlossene Oberfläche, flipped triangles / redundante Dreiecke, etc.) ○ Form ○ Hohlräume 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Konstruktion von Volumenkörpern <ul style="list-style-type: none"> ○ Konstruktion von 3D-Modellen ○ Export von 3D-Modellen ▪ Anordnung von virtuellen Bauräumen <ul style="list-style-type: none"> ○ Anordnung von Bauteilen im virtuellen Bauraum ○ Export von Baujob-CAD-Dateien 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Zusammenhang von Designrules mit geometrischen, materiellen Herstellbarkeit/ Konstruktionsbedingungen von SCA-Bauteilen (Beschädigung bei entpacken, Verschmelzung, Scherbeanspruchung/Rissbildung, Bauteil-Abschnitte) ▪ Erweiterte Verständnisse zur 3D-CAD-Software ▪ Zusammenspiel von virtuellem und realem Bauraum (Größe)

	<ul style="list-style-type: none"> ○ Minimalabmessung ○ ... ○ Bauraum <ul style="list-style-type: none"> ○ Abstände (zwischen Volumenkörper / zur Bauraumwandung) ○ Orientierung ○ ... ▪ Datei-Exportformate: <ul style="list-style-type: none"> ○ stl.-Dateiformat ○ 3mf.-Dateiformat 		
<p>... legt die Material- und Prozessparameter fest.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Computer (Office-Anwendung) ▪ Daten der Kundenvorgabe / geforderte Bauteileigenschaften: <ul style="list-style-type: none"> ○ Materialmischung ○ W/Z-Wert ○ Wasserdruck ▪ Prozessparameter: <ul style="list-style-type: none"> ○ Wasserdruck ○ Geschwindigkeiten (Druckgeschwindigkeit, Partikelstregeschwindigkeit, Streuwalzen-Umdrehungsgeschwindigkeit Verdichtungsgeschwindigkeit) ▪ Materialmischungsdaten: <ul style="list-style-type: none"> ○ Mischverhältnisse Einzelmaterialien ○ Mengenbedarf Zement ○ Mengenbedarf Methylcellulose ▪ Übergabeprotokoll Daten: <ul style="list-style-type: none"> • Baujob-Bezeichnung ○ Druckparameter • Bauraum-Screenshot 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bestimmung der (Druck-) Parameter <ul style="list-style-type: none"> ○ Festlegung von Materialmischung, W/Z-Wert, und Wasserdruck nach Kundenvorgabe ○ Festlegung von Mischungsverhältnissen ○ Festlegung von Prozessparametern (Wasserdruck, Geschwindigkeiten) ▪ Erstellung des Übergabeprotokolls ▪ Erstellung des Mischzettels <ul style="list-style-type: none"> ○ Berechnung des Materialbedarfs ○ Übertragung von Mengenangaben 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Zusammenhang von Materialmischung, W/Z und Wasserdruck (Materialparameter) mit Bauteilgeometrie und Materialeigenschaften ▪ Zusammenhang von Wasserdruck und Geschwindigkeiten (Prozessparameter) mit Bauteilgeometrie und Materialeigenschaften ▪ Notwendigkeit von Übergabedokumente (Übergabeprotokoll, Mischzettel)

	<ul style="list-style-type: none"> • ... ▪ Mischzetteldaten: <ul style="list-style-type: none"> • Mischungsbezeichnung ○ Materialarten ○ Mengenangaben 		
Ausgangsmaterialmanagement			
... managet das Ausgangsmaterial.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Lager-Hilfsmittel: <ul style="list-style-type: none"> ○ Lieferschein ○ Hubwagen ▪ Materialarten/-eigenschaften /-datenblätter: <ul style="list-style-type: none"> ○ Quarzsand ○ Zement ○ Methylcellulose ▪ Umgebungsanforderungen: <ul style="list-style-type: none"> ○ Materialspezifische Luftfeuchtigkeit ○ Materialspezifische Temperatur ▪ Materialbestellungsdaten: <ul style="list-style-type: none"> ○ Ausgangsmaterialien/-mengen ○ Materialmischungen/-mengen ▪ Materialeingangskontrolle ▪ Lageranforderungen <ul style="list-style-type: none"> ○ Verpackung ○ Witterungsschutz (Feuchte, Frost) ○ Dauer ○ (Material-)Beschriftung ○ (Material-)Behältnisse 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Durchführung von Materialbestellungen (Art, Menge, inkl. Materialmischung) ▪ Prüfung des Materialeingangs ▪ Organisation des Lagers <ul style="list-style-type: none"> ○ Lagerung von Materialien ○ Beschriftung von Eingangsmaterialien (und Materialmischungen) ○ Umfüllung von Materialien 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Auswirkung des Ausgangsmaterialmanagements auf Folgeprozesse ▪ Besonderheiten der Materiallagerung (inkl. Materialbeschriftung/-bezeichnung/-eingangskontrolle)
... bereitet die Materialmischung vor.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Misch-/Wiege-Werkzeuge: <ul style="list-style-type: none"> ○ (Fein-)Waage ○ Mischer (Mischtrommel mit Deckel) ▪ Misch-/Wiege-Hilfsmittel: 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Vorbereitung der Materialmengen <ul style="list-style-type: none"> ○ Bereitstellung von Ausgangsmaterialien 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ursachen und Folgen von Rezepturabweichungen (u. a. auch Messgenauigkeit)

	<ul style="list-style-type: none"> ○ Mischbehälter (groß/klein) ○ Mobile Absaugung ○ Schaufel ○ Verlängerungskabel ○ Trichter ○ Abfüllbehälter ○ Stift und Klebeband ○ Hubwagen ▪ Mischzetteldaten: <ul style="list-style-type: none"> ○ Materialart ○ Materialmengen ▪ Mischvorgang: <ul style="list-style-type: none"> ○ Mischreihenfolge ○ Mischneigung ○ Mischzeiten ○ Homogenität ▪ Materialarten/-eigenschaften: <ul style="list-style-type: none"> ○ Quarzsand ○ Zement ○ Methylcellulose ▪ Umgebungsanforderungen: <ul style="list-style-type: none"> ○ Luftfeuchtigkeit ○ Temperatur ▪ Materialabfüllung: <ul style="list-style-type: none"> ○ Behältnis-Anforderungen ○ Beschriftung 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Einrichtung der Waage ○ Abwiegen von Ausgangsmaterialien ▪ Herstellung von Materialmischungen <ul style="list-style-type: none"> ○ Zugeben von Materialmengen ○ Mischung von Materialien ▪ Nachbereitung der Materialmischung <ul style="list-style-type: none"> ○ Abfüllung von Materialmischungen ○ Beschriftung von Materialmischungen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Auswirkung der Methylcellulose auf Bauteilgeometrie und Festigkeit ▪ Verunreinigungen ▪ Homogenität ▪ Auswirkung des Umgebungsklimas auf Materialmischung und Bauteileigenschaften
Anlagenbezogene Prozessvorbereitung			
<p>... bereitet die Anlage vor.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Anlagenelemente: <ul style="list-style-type: none"> ○ Drucker-PC ○ Drucker-Software ○ Fluidprogramm (Modultest) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Einrichtung der Anlage ▪ Vorbereitung des Fluidbehälters <ul style="list-style-type: none"> ○ Öffnung von Druckventilen ○ Nachfüllung des Fluidbehälters 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Funktionsweise der Anlagenbedienungssteuerung (Bedienpult, Software, ...)

	<ul style="list-style-type: none"> ○ ... ○ Bedienpult ○ Schaltschrank ○ Druckkopfdüsen ○ Fluiddruckbehälter ○ Fluiddruckregelung ▪ Reinigungs-Hilfsmittel: <ul style="list-style-type: none"> ○ Bürste ○ Schlüssel ○ Feinbohrer ▪ Destilliertes Wasser (Wasserarten) ▪ Externe Anschlüsse/ Versorgung: <ul style="list-style-type: none"> ○ Druckluftventil ○ Druckluftzufuhr <ul style="list-style-type: none"> ○ Eigenschaften ○ Versorgungsdruck 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Durchführung von Modultests ▪ Reinigung von Düsen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Erweiterte Verständnisse zur Druckersoftware (Fehler in Software zur Z-Position) ▪ Zusammenhang von Wassermenge und Druckvorgang ▪ Besonderheiten der Wasserart ▪ Auswirkung von Wasserarten auf Funktionsfähigkeit der Düsen ▪ Funktionsweise des Fluidversorgungssystems
<p>... bereitet den Baujob vor.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Anlagenelemente: <ul style="list-style-type: none"> ○ Drucker-PC ○ Drucker-Software <ul style="list-style-type: none"> ○ Dateiimport ○ Zentrierung Bauraumanordnung ○ Parametereingabe <ul style="list-style-type: none"> • Verahreinstellungen ○ Fluiddruckregelung (Manometer) ○ Bedienpult ○ Linearachsen ○ Materialbehälter ○ Streuwalze ○ Glätte- und Verdichtungswalze ○ Bauplattform ○ Bauplattformdichtung ○ Bauraumwandung 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Einstellung baujobbezogener Daten <ul style="list-style-type: none"> ○ Import der Druckdatei ○ Positionierung der Datei im virtuellen Bauraum ○ Eingabe von SPS-Parameter und Einstellung des Wasserdrucks ▪ Erstellung der Basisschicht <ul style="list-style-type: none"> ○ Befüllung des Streugeräts ○ Ausführung des Materialauftrags ○ Prüfung der Basisschicht-Qualität 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Notwendigkeit einer sorgfältigen/zuverlässigen Eingabe der Parameter (nach Übergabeprotokoll) ▪ Zusammenhang von Baujob-Positionierung und Druckbereich ▪ Zusammenspiel der SPS-Parameter mit Bauteileigenschaften ▪ Abstimmung der Wasserapplikation auf Partikelbett ▪ Funktionsweise des Fluidversorgungssystems

	<ul style="list-style-type: none"> ○ Auffangbehälter ▪ Vorbereitungs-Hilfsmittel: <ul style="list-style-type: none"> ○ Schaufel ○ Transportwagen ○ Staubsauger Drucker ○ Mobile Absaugung ▪ Übergabeprotokolldaten: <ul style="list-style-type: none"> ○ Druck-Datei ○ Wasserdruck ○ Druckgeschwindigkeit ○ Schichtstärke ○ Partikelstreugeschwindigkeit ○ Streuwalzen- Umdrehungsgeschwindigkeit ○ Verdichtungsgeschwindigkeit ▪ Materialmischung ▪ Umgebungsanforderungen: <ul style="list-style-type: none"> ○ Luftfeuchtigkeit ○ Temperatur ▪ Externe Anschlüsse/ Versorgung: <ul style="list-style-type: none"> ○ Druckluftzufuhr ○ ... ▪ (Qualitäts-)Merkmale zur Basisschicht: <ul style="list-style-type: none"> ○ Verdichtung ○ Oberfläche (unsauber, lückenhaft) 		<p>(Zusammenhang der Luftdruckversorgung mit Wasserdruck)</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Auswirkung des Umgebungsklimas auf Materialmischung und Bauteileigenschaften ▪ Einflüsse (insb. der Maschinenkomponenten) auf die Güte der Basisschicht (Dichte und Oberfläche)
Prozessführung			
<p>... führt den Druckvorgang aus.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Alle Anlagenelemente: <ul style="list-style-type: none"> ○ Steuerung ○ Manipulator ○ Streugerät 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Beobachtung/Überwachung des Druckvorgangs ▪ Sicherstellung des Materialflusses 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Besonderheiten zur Nachfüllung der Materialmischung

	<ul style="list-style-type: none"> ○ Fluidsystem ○ Bauraum ○ ... ▪ Druck-Hilfsmittel: <ul style="list-style-type: none"> ○ Schaufel ○ Auffangbehälter ○ Materialmischungsbehälter ▪ Materialmischung ▪ Umgebungsanforderungen: <ul style="list-style-type: none"> ○ Luftfeuchtigkeit ○ Temperatur ▪ Externe Anschlüsse/ Versorgung: <ul style="list-style-type: none"> ○ Druckluftzufuhr ○ ... ▪ Partikelschichtanforderungen: <ul style="list-style-type: none"> ○ Material ○ Packungsdichte ○ Oberflächenqualität ▪ Wasserauftragsanforderungen: <ul style="list-style-type: none"> ○ Lokalität ○ Menge ○ Druck ▪ Hydratation 		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Einflüsse (insb. der Maschinenkomponenten) auf die Güte der Partikelschicht (Lücken, Dichte und Oberfläche) ▪ Auswirkungen der Partikelschichtgüte auf Bauteileigenschaften (Lokale Schwächung, Einschlüsse) ▪ Zusammenspiel der Prozessparameter mit Bauteileigenschaften ▪ Abstimmung von Wasserapplikation mit Partikelbett ▪ Einflüsse von Maschinenkomponenten (und externer Versorgung) auf den Wasserauftrag ▪ Auswirkung der Wasserapplikationsstelle (Druckkopf und Achsen) auf Bauteileigenschaften (Lokale Schwächungen) ▪ Prinzip zur Hydratation ▪ Auswirkung von Umgebungsklima auf Hydratation
--	---	--	--

			○ Notwendigkeit der Druckprozessüberwachung
Anlagenbedingt Prozessnachbereitung			
... bereitet den Materialüberschuss nach.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Anlagenelemente: <ul style="list-style-type: none"> ○ Steuerung ○ Manipulator ○ Materialbehälter ○ Bauraum ○ ... ▪ Nachbereitungs-Hilfsmittel: <ul style="list-style-type: none"> ○ Abfüllbehälter ○ Spachtel ○ Schaufel (Materialart) ○ Mobiler Staubsauger ○ Mobile Absaugung ○ Stift und Klebeband ○ Hubwagen ▪ Umgebungsanforderungen: <ul style="list-style-type: none"> ○ Luftfeuchtigkeit ▪ Wiederverwendung von Materialüberschuss: <ul style="list-style-type: none"> ○ Verunreinigung ○ Teilaktiviertes Material ▪ Materialabfüllung: <ul style="list-style-type: none"> ○ Behältnis-Anforderungen ○ Beschriftung 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Nachbereitung von Material- und Auffangbehälter ▪ Säuberung des Bauraumes ▪ Nachbereitung der Materialmischung <ul style="list-style-type: none"> ○ Abfüllung von Materialmischungen ○ Beschriftung von Materialmischung 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ressourceneffizienz ▪ Wiederverwendbarkeit von Materialmischung (Bedingungen an die Materialeigenschaften zur Verunreinigung, Feuchte, Teilaktivierung) ▪ Risiken auf Folgedrucke bei Wiederverwendung von Materialmischungen
... bereitet die Anlage nach.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Alle Anlagenelemente: <ul style="list-style-type: none"> ○ Steuerung ○ Manipulator ○ Fluiddruckregelung ○ Fluidbehälter 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Säuberung der Anlage ▪ Reinigung von Düsen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sorgfältigkeit bei der Maschinenreinigung (Materialreste und Düsen) ▪ Kontamination von Materialmischungen

	<ul style="list-style-type: none"> ○ Druckkopfdüsen ○ Luftfilter ○ ... ▪ Reinigungs-Hilfsmittel: <ul style="list-style-type: none"> ○ Bürste (Bürstenhärte) ○ Schlüssel ○ Feinbohrer ▪ Düsenreinigung(-smethoden): <ul style="list-style-type: none"> ○ Herstelleranleitungsdaten ○ ... ▪ Anlagenreinigung: <ul style="list-style-type: none"> ○ Relevante Maschinenkomponenten ○ Reinheit ○ Materialanhaftung ○ Beschädigung 		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Auswirkung von Düsensauberkeit und -funktionsfähigkeit auf Folgeprozesse
Bauteilbezogene Nachbereitung			
<p>... bereitet das Bauteil nach.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Anlagenelemente: <ul style="list-style-type: none"> ○ Drucker-PC ○ Drucker-Software ○ Bedienpult ○ Bauraum ▪ Ausgrab-/Säuberungs-Hilfsmittel: <ul style="list-style-type: none"> ○ Gitterbox ○ Kunststoffbürste/Pinsel (groß/klein) ○ Spachtel (breit/schmal) ○ Metallschaufel ○ Messwerkzeug ▪ Anforderungen an Bauteilentnahme: <ul style="list-style-type: none"> ○ Verweildauer (Grünstandfestigkeit) ○ Beschädigungen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ausgrabung von Bauteilen ▪ Säuberung von Bauteilen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ursachen und Folgen einer Bauteilbeschädigung (u. a. Sorgfalt, Grünstandfestigkeit, Hilfsmittel-Methode) ▪ Zusammenhang von Geometrieabweichung und teilaktiviertem bzw. anhaftenden Material bei der Bauteilsäuberung

	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bauteilsäuberung: <ul style="list-style-type: none"> ○ Säuberungsqualität/-güte ○ (Nicht-)Aktivierte Partikel ○ Pinsel-/Bürstenhärte 		
<p>... behandelt das Bauteil nach.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Wasserstation: <ul style="list-style-type: none"> ○ Wasserschlauch ○ Wassersprühdüse ○ ... ▪ Umgebungsanforderungen: <ul style="list-style-type: none"> ○ Luftfeuchtigkeit ○ Temperatur ▪ Bauteilwässerung: <ul style="list-style-type: none"> ○ Sprühmenge ○ Verweildauer ▪ Bauteillagerung nach DIN 1290-2: <ul style="list-style-type: none"> ○ Verweildauer ○ Lagerbedingungen/-vorgang 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Nachbehandlung von Bauteilen ▪ Lagerung von Bauteilen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Prinzip zur vollständigen Hydratation ▪ Einflüsse auf Bauteilaushärtung (Wässerung, Lagerung Verweildauer, Umgebungsklima)

Kompetenzmatrix: Selective Cement Activation (SCA)

Fertigungsverfahren	Selektive-Zement-Aktivierung (SCA)		
Berufliche Handlung <i>Die Fachkraft...</i>	Korrespondierendes Wissen		
	Sachwissen	Prozesswissen	Reflexionswissen
Datenvorbereitung ... erstellt die 3D-CAD Daten.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 3D-CAD Werkzeuge: <ul style="list-style-type: none"> ○ Computer (für 3D-CAD Anwendungen) ○ CAD-Software: <ul style="list-style-type: none"> • Konstruktionswerkzeuge • Bearbeitungswerkzeuge ○ Dreiecksnetz / Mesh ○ Skalierung / Maßstab ○ Datelexportformate ○ ... ▪ Hilfsmittel-Datenübermittlung: <ul style="list-style-type: none"> ○ USB-Stick ▪ Designrules: <ul style="list-style-type: none"> • Form • Hohlräume • Minimalabmessung ○ Mesh ○ ... ▪ Handbuchdaten zum Drucker: <ul style="list-style-type: none"> ○ Bauraumgröße ○ Mindestabstand Volumenkörper ○ Importformate ○ ... 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Konstruktion von Volumenkörpern ▪ Erstellung zum virtuellen Bauraum <ul style="list-style-type: none"> ○ Anordnung von Bauteilen ○ Export von Baujob-CAD-Dateien 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Erweiterte Verständnisse zur 3D-CAD-Software (Mesh, Maßstab, Bauraum, Dateiformat) ▪ Zusammenhang von 3D-Modellen und finaler Bauteilgeometrie ▪ Einflüsse von Bauteilanordnung auf Bauteilgeometrien

<p>... legt die Druck- und Mischdaten fest.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Computer (Office-Anwendungen) ▪ Bauteilanforderungsdaten ▪ Prozessparameter: <ul style="list-style-type: none"> ○ w/z-Wert ○ Schichtdicke ○ Durchflussrate ○ Reindichte Gesteinskörnung ○ Schüttdichte ○ GF-Anteil in V-% ○ Verfahrensgeschwindigkeit ○ Wasserdruck ○ Druckparameterprofil ○ ... ▪ Mischmengen: <ul style="list-style-type: none"> ○ Mischverhältnis ○ Zementmenge ○ Quarzsandmenge ○ Mengenanteil-Additive ○ ... ▪ Mischdaten: <ul style="list-style-type: none"> ○ Mischzeiten ○ Mischintensität <ul style="list-style-type: none"> • Drehzahl Wirbler • Drehzahl Mischbehälter ▪ Datenübermittlung: <ul style="list-style-type: none"> ○ Druckparameterprofil ○ Schichtdicke ○ Materialmischung ○ Mischdaten/-mengen ○ ... 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bestimmung von (Druck-) Parameter <ul style="list-style-type: none"> ○ Festlegung der Prozessparameter ○ Übermittlung von Prozessparameter mit Profilnummer ▪ Bestimmung von Materialmengen <ul style="list-style-type: none"> ○ Festlegung der Materialmischung ○ Berechnung von Materialmengen ▪ Festlegung von Mischdaten ▪ Übermittlung von Mischdaten/-mengen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Zusammenhang zwischen Druckparameter und Bauteileigenschaften/-geometrie ▪ Sorgfältigkeit bei der Datenübermittlung ▪ Zusammenhang von. Materialmengen/-art auf Bauteileigenschaften/-geometrie sowie Ökonomie
---	---	---	--

Ausgangsmaterialmanagement			
<p>... managet das Ausgangsmaterial.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Materialbestellung: <ul style="list-style-type: none"> ○ Ausgangsmaterialien ○ Materialmischungen ○ Mengendaten ▪ Materialeingangskontrolle: <ul style="list-style-type: none"> ○ Lieferschein ○ ... ▪ Lager-Hilfsmittel: <ul style="list-style-type: none"> ○ Lagersystem ○ Transportwagen ○ Folienschweißgerät ▪ Materialarten /-eigenschaften /-bezeichnung /-firmen: <ul style="list-style-type: none"> ○ Quarzsand ○ Zement ○ Methylcellulose ○ Materialmischung ▪ Umgebungsanforderungen: <ul style="list-style-type: none"> ○ Luftfeuchtigkeit ○ Temperatur 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Durchführung einer Materialbestellung (Art, Menge, inkl. Materialmischung) ▪ Prüfung zum Materialeingang ▪ Umverpackung von Zement ▪ Organisation des Lagers 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Auswirkung des Ausgangsmaterialmanagements auf Folgeprozesse ▪ Zusammenhang und Besonderheiten von Materialeigenschaften und Lagerbedingungen
<p>... bereitet die Materialmischung vor.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Misch-/Wiege-Werkzeuge: <ul style="list-style-type: none"> ○ Mischer <ul style="list-style-type: none"> ○ Steuereinheit ○ Mischertrommel (mit Klappe) ○ Mischbehälter ○ Wirbler ○ Waage ○ ... ▪ Misch-/Wiege-Hilfsmittel: <ul style="list-style-type: none"> ○ Messbehälter 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Vorbereitung der Materialmengen <ul style="list-style-type: none"> ○ Bereitstellung von Materialien ○ Abwiegen von Materialmengen ▪ Herstellung der Materialmischung <ul style="list-style-type: none"> ○ Zugabe von Materialmengen ○ Einstellung von Mischzeit und Mischintensität 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ursachen und Folgen von Materialmengen- und -artabweichung ▪ Einflüsse der Mischmethode-/reihenfolge auf Materialmischung ▪ Homogenität ▪ Besonderheiten zur Materialmischungs-lagerung

	<ul style="list-style-type: none"> ○ Abfüllbehälter ○ Stift und Klebeband ○ Besen ○ Schaufel ○ Tuch ○ Cutter-Messer ○ Transportwagen ▪ Mischvorgabe: <ul style="list-style-type: none"> ○ Materialarten ○ Materialmengen ○ Reihenfolge bei Additiven ○ Homogenität ○ ... 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Nachbereitung von Materialmischungen <ul style="list-style-type: none"> ○ Abfüllung von Materialmischungen ○ Beschriftung von Materialmischungen ▪ Säuberung des Mixers 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Auswirkung des Umgebungsklimas auf Materialmischung
Anlagenbezogene Prozessvorbereitung			
<p>... bereitet die Anlage vor.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Anlagenelemente: <ul style="list-style-type: none"> ○ Drucker-PC ○ Drucker-Software ○ Bedienpult ○ Schaltschrank ○ Druckportal ○ Wasserbehälter ○ Wasserdruckregelung ○ Druckkopf <ul style="list-style-type: none"> ○ Düsen ○ Düsenschließmechanismus ▪ Reinigungs-Hilfsmittel: <ul style="list-style-type: none"> ○ Staubsauger ○ (Messing-)Bürste ○ Schlüssel ○ Feinbohrer ○ Lampe ▪ Wasserarten 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Einrichtung der Anlage <ul style="list-style-type: none"> ○ Starten der Anlage ○ Kontrolle zum Staubsaugerfüllstand ○ Kontrolle zur Walzensauberkeit ○ Nachfüllung des Wasserbehälters ▪ Durchführung von Düsentests ▪ Reinigung von Düsen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Funktionsweise zur Anlagenbedienung/-steuerung (inkl. Software) ▪ Funktionsweise des Fluidsystems ▪ Relevanz des Fluidsystems für Druckprozess ▪ Besonderheiten von Wasserarten ▪ Auswirkung von Materialresten für aktuellen und folgenden Druck ▪ Notwendigkeit der Walzensauberkeit

	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Umgebungsanforderungen: <ul style="list-style-type: none"> ○ Staubkonzentration ○ ... ▪ Externe Anschlüsse/ Versorgung: <ul style="list-style-type: none"> ○ Luftdruckregelung ○ Druckluft <ul style="list-style-type: none"> ○ Eigenschaften ○ Versorgungsdruck 		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Schwergängigkeit von Achsen
<p>... bereitet den Baujob vor.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Anlagenelemente: <ul style="list-style-type: none"> ○ Drucker-PC ○ Drucker-Software ○ Bedienpult ○ Schaltschrank ○ Druckportal ○ Materialbehälter ○ Brückenbrecher ○ Streuwalze ○ Ausbürstband ○ Bauraum ○ Verdichtungswalze ○ ... ▪ Vorbereitungs-Hilfsmittel: <ul style="list-style-type: none"> ○ Abfüllbehälter ○ Schaufel ○ Transportwagen ○ Staubsauger ○ Mobile Absaugung ▪ Baujob-Daten: <ul style="list-style-type: none"> ○ 3D-CAD-Datei (mit Skalierung) ○ Dateiladeeinstellung (Slicing) ○ Schichtdicke ○ Druckparameterprofil 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Laden von CAD-Datei(en) <ul style="list-style-type: none"> ○ Import von CAD-Datei(en) ○ Einstellung der Slicing-Schichtdicke ▪ Laden von Druckparameterprofil(en) ▪ Erstellung der Basisschicht <ul style="list-style-type: none"> ○ Befüllung des Materialspeichers ○ Ausführung des Materialauftrags ○ Prüfung der Basisschicht-Qualität 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sorgfältigkeit und Zuverlässigkeit der Arbeit (CAD-Datei, Druckparameterprofil, Materialmischung) ▪ Zusammenhang von Druckparameterprofil und Wassereintrag ▪ Zusammenhang von Druckparameterprofil und Bauteileigenschaften ▪ Auswirkung des Umgebungsklimas auf Materialmischung und Bauteileigenschaften ▪ Einflüsse (insb. der Maschinenkomponenten) auf die Güte der Basisschicht (Dichte und Oberfläche)

	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Handbuchdaten zum Drucker: <ul style="list-style-type: none"> ○ Vorgang Basisschichterstellung ○ Merkmale zur Basisschicht <ul style="list-style-type: none"> • Verdichtung • Oberfläche ▪ Materialmischungsdaten ▪ Umgebungsanforderungen: <ul style="list-style-type: none"> ○ Luftfeuchtigkeit ○ ... 		
Prozessführung			
<p>... führt den Druckvorgang aus.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Alle Anlagenelemente: <ul style="list-style-type: none"> ○ Drucker-PC ○ Drucker-Software ○ Bedienpult ○ Druckportal ○ Fluidsystem ○ Partikelauftragssystem ○ Absaugung ○ ... ▪ Druck-Hilfsmittel: <ul style="list-style-type: none"> ○ Staubsauger ○ Schaufel ▪ Beobachtungskriterien: <ul style="list-style-type: none"> ○ Materialbehälter ○ Verdichtungswalze ○ Düsen (-reinigung) ○ Partikelbett (Oberfläche) ○ Druckbild ○ Wasserdruck ○ Absaugfluss ○ Abfallbehälter ○ Staubsaugerfilter 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Beobachtung/Überwachung des Druckvorgangs ▪ Sicherstellung des Materialflusses 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Notwendigkeit der Druckprozessüberwachung ▪ Auswirkung der Partikelschicht (Dicke, Verdichtung, Oberfläche) auf Bauteileigenschaften ▪ Besonderheiten zur Nachfüllung der Materialmischung ▪ Einflüsse (insb. der Maschinenkomponenten) auf die Güte der Partikelschicht (Verdichtung und Wasserauftrag, Vollständigkeit aller Schichten)

	<ul style="list-style-type: none"> ○ Layerstärke ▪ Wasserapplikationskriterien: <ul style="list-style-type: none"> ○ Menge ○ Ort ▪ Materialmischungsdaten ▪ Hydratation ▪ Umgebungsanforderungen: <ul style="list-style-type: none"> ○ Luftfeuchtigkeit ○ Temperatur ▪ Externe Anschlüsse / Versorgung: <ul style="list-style-type: none"> ○ Konstante Stromzufuhr ○ Konstante Luftdruckzufuhr 		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Zusammenhang zwischen Bauteilgeometrie und Wasserapplikationsmenge ▪ Abweichungen von Wasserapplikations-Lokalität ▪ Prinzip zur Hydratation ▪ Auswirkung von Umgebungsklima auf Hydratationsvorgang
Anlagenbedingt Prozessnachbereitung			
<p>... bereitet den Materialüberschuss nach.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Anlagenelemente: <ul style="list-style-type: none"> ○ Materialbehälter ○ Bauraum ○ ... ▪ Hilfsmittel: <ul style="list-style-type: none"> ○ Schaufel ○ Klebeband Stift ○ Transportwagen ▪ Lageranforderungen: <ul style="list-style-type: none"> ○ Verpackung ○ Witterungsschutz ▪ (Material-)Beschriftung ▪ (Material-)Behältnis ▪ Umgebungsanforderungen: <ul style="list-style-type: none"> ○ Luftfeuchtigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Leerung von Materialspeicher ▪ Säuberung des Bauraumes <ul style="list-style-type: none"> ○ Entfernung von Materialüberschuss ○ Abfüllung von Materialmischungen (inkl. Beschriftung) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ressourceneffizienz durch Wiederverwendung von Materialmischungen ▪ Auswirkung von Umgebungsklima auf Materialmischung ▪ Risiken auf Folgedrucke bei Wiederverwendung von Materialmischungen
<p>... bereitet die Anlage nach.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Alle Anlagenelemente: <ul style="list-style-type: none"> ○ Drucker-PC ○ Drucker-Software 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Säuberung der Anlage ▪ Reinigung von Düsen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kontamination von Materialmischungen

	<ul style="list-style-type: none"> ○ Druckportal ○ Druckkopf <ul style="list-style-type: none"> ○ Düsen ○ ... ▪ Reinigungs-Hilfsmittel: <ul style="list-style-type: none"> ○ Besen ○ Staubsauger ○ (Messing-)Bürste ○ Reinigungsmittel ○ Schmier-/Gleitmittel ○ Schlüssel ○ Feinbohrer ▪ Anlagenaufbau und -wartungselemente ▪ Düsenaufbau 		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Auswirkung auf Folgedrucke (und Bauteileigenschaften) durch Kontamination ▪ Notwendigkeit der Düsensauberkeit und -funktionsfähigkeit
Bauteilbezogene Nachbereitung			
<p>... bereitet das Bauteil nach.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Anlagenelemente: <ul style="list-style-type: none"> ○ Drucker-PC ○ Drucker-Software ○ Druckportal ○ Bauraum ○ ... ▪ Auspackstation ▪ Ausgrab-/Säuberungs-Hilfsmittel: <ul style="list-style-type: none"> ○ Schaufel ○ Bürste ○ Spachtel ○ Gitterbox ○ Abfallbehälter ○ Transport-/Hubwagen ○ ... 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ausgrabung von Bauteilen <ul style="list-style-type: none"> ○ Entfernung des Partikelbetts ○ Entnahme von Bauteilen ○ Absaugen von Bauteilen ▪ Säuberung von Bauteilen <ul style="list-style-type: none"> ○ Entfernung nicht aktivierter Partikel ○ Reinigung von Bauteilen (mit Druckluft) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sorgfältigkeit bei der Entfernung von unaktiviertem Material ▪ Abhängigkeit des Entpackens von der Grünstandfestigkeit ▪ Verständnis von Auspacken und Hilfsverwendung und Vermeidung von Bauteilbeschädigung

	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bauteilentnahme/-säuberung: <ul style="list-style-type: none"> ○ Aushärtezeit (Grünstandfestigkeit) ○ Vorgehen zum Ausgraben ○ Vorgehen zum Säubern ○ Druckluftreinigung ○ Aktivierte Partikel ○ Nicht aktivierte Partikel ○ ... 		
<p>... behandelt das Bauteil nach.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Wasserbad ▪ Bauteilwässerungsvorgang: <ul style="list-style-type: none"> ○ Bauteilgröße ○ Dauer/Wartezeit ○ Festigkeitssteigerung ▪ Bauteillagerung: <ul style="list-style-type: none"> ○ Klimakammer ○ Verweildauer ○ Lagerbedingungen (DIN 1290-2) ▪ Umgebungsanforderungen: <ul style="list-style-type: none"> ○ Luftfeuchtigkeit ○ Temperatur 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Wässerung von Bauteilen <ul style="list-style-type: none"> ○ Einlagerung von Bauteilen in Wasserbad ○ Entnahme von Bauteilen ▪ Lagerung von Bauteilen nach DIN 1290-2 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sorgfältigkeit der Arbeit (u. a. Einhaltung von Wartezeiten) ▪ Prinzip zur Festigkeitsentwicklung von Bauteilen ▪ Auswirkungen des Umgebungsklimas auf Bauteilaushärtung

Kompetenzmatrix: Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM)

Fertigungsverfahren	Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM)		
Berufliche Handlung <i>Die Fachkraft...</i>	Korrespondierendes Wissen		
	Sachwissen	Prozesswissen	Reflexionswissen
Datenvorbereitung			
<p>... erstellt die Bahnplanung.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 3D-CAD-Werkzeuge: <ul style="list-style-type: none"> • Computer für 3D-CAD Anwendungen • CAD-Software: <ul style="list-style-type: none"> • Importformate • Anlagen-/Robotermodelle <ul style="list-style-type: none"> ▪ Tool-Centerpoint ▪ Dreh-Kipptisch • Bearbeitungswerkzeuge • Ansichts-/ Darstellungsfunktionen und Simulation ▪ Bahnplanungsparameter: <ul style="list-style-type: none"> • Spurbreite • Spurbreite • Jobnummer (Kartei in Stromquelle) • Berechnungsart • Strategie der Füllbahn • Standard-Bahnsteuerung • Layer-Benennung 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Vorbereitung von CAD-Geometrie <ul style="list-style-type: none"> • Import von CAD-Datei(en) in Anlagenmodell • Platzierung von CAD-Datei(en) • Auswahl und Anwendung einer Slicing-Methode ▪ Bestimmung und Eingabe von Bahnplanungsparameter ▪ Modifizierung zur Bahnplanung ▪ Prüfung der Bahnplanung ▪ Export von Bahnplanungsdatei(en) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Notwendigkeit der Dateieigenschaften und -bezeichnungen ▪ Zusammenhänge von virtuellen Anlagenmodellen zu realer Anlage ▪ Rotationssymmetrie ▪ Abstimmung der Positionierung mit Grundplatte ▪ Überhangsprinzipien (Slicing-Methoden) ▪ Abstimmung von Robotervorschubgeschwindigkeit mit Schweißparameter ▪ Einflüsse auf Raupengeometrie ▪ Abstimmung von Lagenhöhe mit Schweißparameter

	<ul style="list-style-type: none"> • ... ▪ Schweißprotokolldaten ▪ Kriterien zu Slicing-Methoden: <ul style="list-style-type: none"> • Geometrische Restriktionen • Slicing-Arten von Überhängen • ... ▪ Kriterien zur Anpassung der Bahnplanung: <ul style="list-style-type: none"> ○ Start-/Endpunkte ○ An-/Abfahrbewegung ○ Spurabstand ○ Vektororientierung ○ ... ▪ Dateiexport: <ul style="list-style-type: none"> • Bögen in Vektorkontur • Post-Prozessor • NC-Dateipfad • Dateibenennung 		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Besonderheiten zu Gasvor- und -nachströmzeiten ▪ Prinzipien zur Lagengeometrie ▪ Besonderheiten zur An- und Abfahrbewegungen ▪ Besonderheiten der Brennerneigung ▪ Bahnplanungsprinzipien (Achsenausrichtung, Umorientierung von Vektoren, Fertigungsumgebung, Arbeitsbereich) ▪ Besonderheiten zur Post-Prozessorwahl
Ausgangsmaterialmanagement			
<p>... managet das Ausgangsmaterial.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Materialbestellung: <ul style="list-style-type: none"> • Schweißzusatzwerkstoffe • Schweiß-Hilfsstoffe (Zusammensetzung) • Grundplatten (Stahlarten) ▪ Materialeingangskontrolle: <ul style="list-style-type: none"> • Lieferschein • Werkszeugnis • Materialaufkleber/-stempel 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bestellung von WAAM-Ausgangsmaterialien ▪ Annahme und Kontrolle der Ausgangsmaterialien ▪ Organisation des Lagers 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Auswirkung des Ausgangsmaterialmanagements auf Folgeprozesse ▪ Notwendigkeit der Materialkennzeichnung ▪ Besonderheiten der Schweißzusatzwerkstoffe

	<ul style="list-style-type: none"> • Messung mit Toleranzen ▪ Lager-Hilfsmittel: <ul style="list-style-type: none"> • Transport-/Hubwagen ▪ Lagersysteme/-anforderungen: <ul style="list-style-type: none"> ○ Umgebungsklima ○ Witterungsschutz 		
... bereitet die Grundplatte vor.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Vorbereitungs-Werkzeuge: <ul style="list-style-type: none"> • Metallsäge • Sandstrahler ▪ Hilfsmittel: <ul style="list-style-type: none"> • Transport-/Hubwagen • Reinigungsmittel ▪ Übergabedaten: <ul style="list-style-type: none"> • Grundplatten-Format • Materialeigenschaften • Materialstempel/-kennzeichnung ▪ Grundplatteneigenschaften: <ul style="list-style-type: none"> • Dicke • Toleranz • Ebenheit • Oberflächenbeschaffenheit 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Formatierung von Grundplatten <ul style="list-style-type: none"> • Bereitstellung und Abmessung von Grundplatte(n) • Formatierung von Grundplatte(n) • Kennzeichnung der Grundplatte ▪ Bearbeitung der Grundplattenoberfläche 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Verbindungseingang/Haftung von Metallarten ▪ Prozessauswirkungen bei abweichender Grundplattendicke/-format/-ebenheit ▪ Notwendigkeit der Oberflächenreinheit der Grundplatte
Anlagenbezogene Prozessvorbereitung			
... bereitet das WAAM-System vor.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ WAAM-Systemelemente: <ul style="list-style-type: none"> • Schweißstromquelle / Regelungseinheit • Steuerungskasten/ Robotersteuerung 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Einrichtung des WAAM-Systems <ul style="list-style-type: none"> • Start des WAAM-Systems • Einrichtung der Absaugung • Ein- und Ausrichtung des Pyrometers 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kommunikation von Roboter und Stromquelle ▪ Arbeitssicherheit

	<ul style="list-style-type: none"> • Industrieroboter • Dreh-Kipptisch • Bedienpanel • Temperatursensor/ Pyrometer • Prozessdatenscanner • Absaugung • ... ▪ Anleitungsdaten zum WAAM-System ▪ Handbuchdaten zu Pyrometer: <ul style="list-style-type: none"> • Pyrometersausrichtung • Messpunkte • Emission • ... ▪ Prozessdatenscanner: <ul style="list-style-type: none"> • Log-Frequenz • Trigger-Signal • Sensorik • ... 	<ul style="list-style-type: none"> • Einrichtung des Prozessdatenscanners 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Besonderheiten zum Messpunkt der Zwischenlagentemperatur ▪ Emissionsgrad und Kollabierung der Schmelze ▪ Zuverlässigkeit von Prozessdaten
<p>... bereitet den Baujob vor.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Alle WAAM-Systemelemente: <ul style="list-style-type: none"> • Schweißstromquelle / Regelungseinheit • Steuerungskasten/ Robotersteuerung • Industrieroboter • Dreh-Kipptisch • Nutplatte 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Laden von Druck-Datei(en) zur Robotersteuerung ▪ Einrichtung der Gaszufuhr <ul style="list-style-type: none"> • Anschluss des Gases • Kontrolle zum Füllmengenstand • Einstellung zum Gasfluss ▪ Einrichtung der Drahtzufuhr <ul style="list-style-type: none"> • Ein-/ Ausbau der Seele 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Notwendigkeit eines sorgfältigen/zuverlässigen Dateiimports ▪ Spannungsveränderungen der Grundplatte ▪ Notwendigkeit des Dry-runs ▪ Verzug der Grundplatte bei unzureichender Festspannung

	<ul style="list-style-type: none"> • Druckminderer (Gasanschluss) • Bedienpanel • Drahtförderrollen/-aufnahme • Drahtvorschubsensor • Seele • Drahtaufnahme-Brenner • Brenner (-öffnung/ -drahtaufnahme) • Schutzgasdüse • Kontaktröhre (-arten) • Temperatursensor/ Pyrometer • ... ▪ Werkzeuge und Hilfsmittel: <ul style="list-style-type: none"> • Prozessdatenscanner • Absaugung • Spannklemme • Schraubenschlüssel • Drahtschneider • Feile • ... ▪ Schweißprotokolldaten ▪ Aufkleber-Daten der Schweißstromquelle 	<ul style="list-style-type: none"> • Einsetzen von Drahtförderrollen • Einsetzen, Förderung und Prüfung des Drahtes • Feilen der Drahtspitze • Einstellung des Anpressdrucks der Drahtförderrollen ▪ Einsetzen und Prüfung des Kontaktröhres ▪ Einrichtung der Grundplatte <ul style="list-style-type: none"> • Platzierung der Grundplatte • Spannung der Grundplatte ▪ Durchführung zum Dry-run 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Anpresskräfte und Einflüsse zur Drahtförderung ▪ Schwarz-Weiß-Trennung und Umlegung ▪ Einflüsse (Drahtdurchmesser, Schutzgasart, Jobnummer/-parameter, Kontaktröhre-Innendurchmesser) auf Raupengeometrie ▪ Realisierung von Überhängen mit Schweißzusatzwerkstoffen ▪ Notwendigkeit des korrekten Schutzgasflusses
--	---	---	---

Prozessführung			
<p>... führt den Druckvorgang aus.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Alle WAAM-Systemelemente – insbesondere: <ul style="list-style-type: none"> • Schweißstromquelle / Regelungseinheit • Steuerungskasten/ Robotersteuerung • Industrieroboter • Dreh-Kipptisch • Bedienpanel • Druckminderer (Gasanschluss) • Drahtpuffer • Temperatursensor/ Pyrometer • ... ▪ Werkzeuge und Hilfsmittel: <ul style="list-style-type: none"> • Prozessdatenscanner • Absaugung • Sichtschutzmaske ▪ Schweißprotokolldaten 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Steuerung des Druckvorgangs 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kollabierung der Schmelze ▪ Einflüsse auf die Zwischenlagentemperatur ▪ Kräftewirkung / Lasten bei Roboterbewegung ▪ Zusammenspiel von Maschinenkomponenten mit²⁷ ▪ Schweißbahnen bzw. Raupengeometrie (Form/Eigenschaften)
Anlagenbedingt Prozessnachbereitung			
<p>... bereitet den Materialüberschuss nach.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ WAAM-Systemelemente: <ul style="list-style-type: none"> • Drahtvorschubeinheit (Stromquelle) • Drahtvorschubeinheit (Brenner) • ... 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ausbau des Drahtes ▪ Lagerung des Drahtes 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Störung von Folgeprozessen

	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Schweißzusatzstoffe: <ul style="list-style-type: none"> • Aufkleber/ Materialbeschriftung • Lagersystem/-anforderungen 		
<p>... bereitet das WAAM-System nach.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Alle WAAM-Systemelemente: <ul style="list-style-type: none"> • Schweißstromquelle / Regelungseinheit • Steuerungskasten/ Robotersteuerung • Industrieroboter • Druckminderer (Gasanschluss) • Bedienpanel • Drahtförderrollen/-aufnahme • Drahtvorschubsensor • Seele • Drahtaufnahme-Brenner • Brenner (-öffnung/-drahtaufnahme) • Schutzgasdüse • Kontaktröhre (-arten) • Temperatursensor/ Pyrometer • ... ▪ Werkzeuge und Hilfsmittel: <ul style="list-style-type: none"> • Absaugung • ... 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Verfahren des Roboterarms ▪ Nachbereitung der WAAM-Komponenten <ul style="list-style-type: none"> • Ausbau von Drahtförderrollen • Ausbau der Gaszufuhr • Ausbau des Kontaktröhres • Aus-/ Einbau der Seele 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Referenzierung des WAAM-Systems ▪ Arbeitssicherheit ▪ Ökonomie und Nachhaltigkeit

	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Anleitungsdaten zum WAAM-System ▪ Verfahr-Programme: <ul style="list-style-type: none"> • Home-Position • ... 		
Bauteilbezogene Nachbereitung			
<p>... entnimmt das Bauteil.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ WAAM-Systemelemente: <ul style="list-style-type: none"> • Dreh-Kipptisch • Nutplatte ▪ Werkzeuge und Hilfsmittel: <ul style="list-style-type: none"> • Prozessdatenscanner • USB-Stick • Spannklemme • Schraubenschlüssel ▪ Spannzeit ▪ Prozessdaten: <ul style="list-style-type: none"> • Log-Frequenz • Trigger-Signal • Sensorik • ... 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ausspannung des Bauteils ▪ Sicherung von Druckprozessdaten 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Spannungen in Endgeometrie ▪ Zuverlässigkeit von Prozessdaten