

Lehrstuhl für Produktentwicklung

Intuitive digitale Geometriemodellierung in frühen Entwicklungsphasen

Franz Daniel Müller

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen
der Technischen Universität München
zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Boris Lohmann

Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Udo Lindemann
2. Univ.-Prof. Dr. rer.nat. Heiner Bubb

Die Dissertation wurde am 25.10.2005 bei der Technischen Universität München eingereicht
und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 04.10.2006 angenommen.

Vorwort des Herausgebers

Problemstellung

Ein erster Schritt auf dem Weg von der Idee zum Produkt ist das Festhalten der Idee in Form einer Skizze. Im Gegensatz zu Fertigungszeichnungen können Skizzen in frühen Entwicklungsphasen auch abstrakte, unscharfe und unvollständige Informationen beinhalten. Sie liegen damit näher am mentalen Modell in der Vorstellung des Entwicklers und können somit kreative Mechanismen bei der Problemlösung besser unterstützen.

Während in den späten Entwicklungsphasen CAD als digitales Werkzeug zur Geometriemodellierung die Tuschezeichnung ablösen konnte, wird in frühen Phasen weiterhin bevorzugt mit Papierskizzen gearbeitet. Die Bedienkonzepte etablierter CAD-Systeme wirken aufgrund ihrer geringen Intuitivität kreativitätshemmend und somit weitgehend ungeeignet für frühe Phasen. Doch auch der Einsatz von Papierskizzen ist mit Einschränkungen verbunden: in der Regel werden Papierskizzen nicht in EDM/PDM-Systemen verwaltet und durch die Zweidimensionalität des Papiers müssen dreidimensionale Ideen in geeignete Darstellungsformen wie Schnitte bzw. mehrere Ansichten umcodiert werden.

Zielsetzung

Die bestehenden Einschränkungen bei der Geometriemodellierung in frühen Phasen können nur durch die Entwicklung innovativer Werkzeuge aufgehoben werden, die die Stärken von Papierskizze und CAD in sich vereinen, ohne deren Nachteile aufzuweisen. Die Zielsetzung dieser Arbeit ist das Schaffen einer fundierten Basis für die Entwicklung zukünftiger Geometriemodellierungswerkzeuge durch die Realisierung eines prototypischen Werkzeugs zur intuitiven digitalen Modellierung dreidimensionaler Skizzen und die Gewinnung grundlegender Erkenntnisse durch den Einsatz dieses Werkzeugs in Fallstudien.

Ergebnisse

Mit dem im Rahmen dieser Arbeit realisierten prototypischen Skizzierwerkzeug ist es möglich, dreidimensionale linienbasierte Skizzen zu erstellen, die mit Hilfe von Stereo-Visualisierung analog zur Papierskizze im Handlungsraum angezeigt werden. Dies ermöglicht einen intuitiven Transfer des mentalen Modells in eine dreidimensionale Darstellung. Durch Rotation kann die 3D-Skizze aus beliebigen Perspektiven betrachtet werden und macht somit die bei Papierskizzen erforderliche Anfertigung mehrerer Ansichten überflüssig. Die Ergebnisse der durchgeführten Versuche zeigen auch Grenzen des linienbasierten Ansatzes speziell bei der Modellierung von Körpern mit gekrümmten Flächen auf und führten zu einer entsprechenden Erweiterung des Bedienkonzeptes.

Folgerungen für die industrielle Praxis

Die derzeit in der Industrie eingesetzten Systeme zur digitalen Geometriemodellierung bieten nur eine unzureichende Unterstützung kreativer früher Entwicklungsphasen. Auch wenn die kommerzielle Realisierung eines intuitiven, in allen Entwicklungsphasen einsetzbaren CAD-Systems mit 3D-Eingabe und stereoskopischer 3D-Darstellung noch einige Zeit in Anspruch nehmen wird, können die Ergebnisse dieser Arbeit konkrete Anregungen für die Weiterentwicklung aktueller Geometriemodellierungssysteme in diese Richtung liefern. Anwender und Systemverantwortliche in der Industrie können konkrete Anforderungen an ihre Systemlieferanten stellen. Produktmanager und Entwickler der Anbieter von Hard- und Software zur Geometriemodellierung erhalten Anregungen für die Verbesserung bestehender Produkte sowie Inspirationen für die Entwicklung neuer innovativer Produkte.

Folgerungen für Forschung und Wissenschaft

Die Ergebnisse dieser Arbeit sind ein erster Schritt auf dem Weg zu einem durchgängigen digitalen 3D-Geometriemodellierungsprozess in der Produktentwicklung. Für eine erfolgreiche Umsetzung in einem kommerziellen Werkzeug mit dem Potenzial, die Papierskizze wirklich ablösen zu können, sind noch einige Fragestellungen durch interdisziplinäre wissenschaftliche Forschungsarbeit zu lösen: neben technischen Fragestellungen wie z. B. geeigneten Datenmodellen gilt es auch die methodischen und prozessualen Rahmenbedingungen für eine vollständig digitale Geometriemodellierung zu klären. Ein weiterer Aspekt ist die Verbesserung der Ergonomie der Hard- und Software, damit zukünftige Produktentwickler ihr Geometriemodellierungswerkzeug intuitiv und ermüdungsfrei über einen gesamten Arbeitstag einsetzen können.

Januar 2007

Prof. Dr.-Ing. Udo Lindemann
Lehrstuhl für Produktentwicklung
Technische Universität München

Danksagung des Autors

Dieses Buch entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Produktentwicklung an der Technischen Universität München. Meinem Doktorvater Professor Lindemann möchte ich herzlich danken für das in mich gesetzte Vertrauen und die kontinuierliche Unterstützung meiner Forschungsarbeit. Besonders erwähnen möchte ich an dieser Stelle die Möglichkeit, die Ergebnisse meiner Arbeit auf der Hannover Messe sowie diversen wissenschaftlichen Konferenzen präsentieren zu können. Des Weiteren gilt mein Dank Professor Bubb, dem Zweitprüfer meiner Dissertation, und Professor Lohmann, dem Vorsitzenden der Prüfungskommission, für die mit meinem Promotionsverfahren verbundene Gutachter- und Organisationstätigkeit.

Die kollegiale Atmosphäre und das produktive Arbeitsklima am Lehrstuhl werden mir immer in Erinnerung bleiben. Einen wesentlichen Beitrag dazu leisteten meine Büromitbewohner Michael Amft, Alexandra Nißl und Jöran Grieb, bei denen ich mich für die anregenden Diskussionen und ihre Unterstützung durch Rat und Tat bedanken möchte. Besonders bedanken möchte ich mich bei Martin Pache, dessen interdisziplinäre Forschungsarbeit über aufwandsarme Modelle im Konstruktionsprozess der Anstoß zur Auseinandersetzung mit der Thematik 3D-Skizzieren war und der auch über seine Zeit am Lehrstuhl hinaus als konstruktiver Diskussionspartner wertvolle Impulse für diese Arbeit gab.

Meinen Diplomanden, Semestranden und wissenschaftlichen Hilfskräften danke ich herzlich für ihr beeindruckendes Engagement und ihre kreativen Ideen. Die Arbeiten von Andreas Gaag, Holger Diehl, Robert Springer, Josef Schneider, Nico Neuweiler, Stefan Schmid, Malte Jung, Andrea Reiter, Sebastian Lex, Thomas Horn, Christian Briegel, Alexander Peters, Felix Abicht, Stefanie Braun, Christoph Thurner, Nicola Schwentner und Sebastian Kain unterstützten die Literaturrecherche, die Realisierung des 3D-Skizzierers, die Durchführung von Versuchen und die Ausarbeitung einzelner Anregungen zur Weiterentwicklung.

Ein ganz besonderer Dank gilt meiner Freundin Nadine, die mich in der Schlussetappe dieser Arbeit hervorragend motivierte und die durch das geduldige Gegenlesen und Korrigieren diverser Vorabstände einen wichtigen Beitrag zum Feinschliff dieses Werkes geleistet hat.

Januar 2007

Franz Daniel Müller

Inhaltsverzeichnis

Problemstellung	3
Zielsetzung	3
Ergebnisse.....	3
Folgerungen für die industrielle Praxis	4
Folgerungen für Forschung und Wissenschaft	4
1 Einleitung und Zielsetzung	1
1.1 Ausgangssituation.....	1
1.2 Problemstellung	3
1.3 Handlungsbedarf.....	5
1.4 Zielsetzung dieser Arbeit.....	7
1.5 Aufbau der Arbeit.....	8
2 Stand der Forschung und Technik	11
2.1 Prozess- und Produktmodelle	11
2.2 Psychologie des Skizzierens.....	16
2.2.1 Kreative Mechanismen beim Problemlösen	17
2.2.2 Werkzeuge und Medien zur Externalisierung des mentalen Modells	23
2.2.3 Förderung der Kreativität und Kommunikation durch Skizzen	25
2.3 Rechnerwerkzeuge.....	29
2.3.1 CAD – Computer Aided Design.....	29
2.3.2 Virtual Reality und Augmented Reality	31
2.3.3 Bedienkonzepte und Usability.....	37
2.3.4 Datenmodelle und Unschärfe	41
2.3.5 Digitales Skizzieren und Modellieren in frühen Phasen	45
2.3.6 Prozessintegration.....	49
2.4 Ableitung von Forschungsbedarf	51
2.4.1 Stärken und Defizite bestehender Werkzeuge.....	51
2.4.2 Forschungsbedarf und Forschungsansatz dieser Arbeit	54
3 Dreidimensionales Skizzieren.....	57
3.1 Einsatzszenarien	57
3.2 Werkzeug zur Erzeugung dreidimensionaler Skizzen.....	60
3.2.1 Allgemeines	61
3.2.2 Machbarkeitsstudie.....	62
3.2.3 Prototyp	66

3.3	Praktische Erfahrungen.....	69
3.3.1	Stärken und Schwächen im Vergleich zu Papier und CAD.....	70
3.3.2	Grenzen des linienbasierten Ansatzes.....	75
3.3.3	Größe des Arbeitsraums.....	79
3.3.4	Head-Tracking	80
3.4	Zusammenfassung und Fazit.....	81
4	Ansätze zur Weiterentwicklung.....	83
4.1	Bedienkonzepte.....	83
4.2	Unterstützung des Konkretisierungsprozesses.....	88
4.3	Ausblick auf mittel- und langfristig realisierbare Ideen	94
4.4	Zusammenfassung.....	98
5	Zusammenfassung und Ausblick.....	99
6	Literatur.....	101
7	Abkürzungsverzeichnis	115
8	Anhang.....	117
8.1	Fragebogen 1. Teil (vor der Versuchsdurchführung).....	118
8.2	Fragebogen 2. Teil (nach der Versuchsdurchführung)	120
9	Dissertationsverzeichnis des Lehrstuhls für Produktentwicklung.....	125

1 Einleitung und Zielsetzung

In diesem einführenden Kapitel wird auf die Motivation, sich mit der Thematik der Geometriemodellierung in frühen Entwicklungsphasen auseinanderzusetzen, eingegangen. Ausgehend von einer Analyse der derzeitigen Ausgangssituation werden Problemstellungen identifiziert und der daraus resultierende Handlungsbedarf abgeleitet. Abschließend wird die Zielsetzung dieser Arbeit diskutiert sowie ein Überblick über ihren Aufbau gegeben.

1.1 Ausgangssituation

Der erste Schritt auf dem Weg von einer Idee zu einem Produkt ist meistens das Festhalten der Idee auf einem externen Medium wie z. B. einer Papierskizze. Auf dieser Basis kann dann die Idee weiter ausgearbeitet werden bis alle zur Herstellung erforderlichen Details festgelegt sind. Auch wenn man eine Idee noch relativ einfach verbal festhalten kann, sind geometrische Repräsentationen spätestens bei steigendem Detaillierungsgrad verbalen Beschreibungen überlegen. Für die Geometriemodellierung existieren verschiedene Medien und Werkzeuge, die abhängig von Entwicklungsphase, Detaillierungsgrad sowie persönlichen Vorlieben und Kenntnissen des jeweiligen Benutzers eingesetzt werden.

Vor der Einführung digitaler Werkzeuge hielten Entwickler/Konstrukteure ihre Ideen hauptsächlich in Form von Skizzen, Zeichnungen und physischen Modellen fest. Diese „analoge“ Art der Geometriemodellierung wurde durch die digitalen Werkzeuge nicht abgelöst, sondern ist heute parallel dazu im Einsatz – vor allem in frühen Phasen der Produktentwicklung. Während für eine Fertigungszeichnung eine vollständige Beschreibung des zu fertigenden Produkts benötigt wird, sind beim Festhalten erster Ideen oder spontaner Lösungen fertigungsrelevante Parameter und spezifische Details wie Toleranzen und Radien von untergeordneter Bedeutung. Hier geht es vielmehr darum, durch die Externalisierung der Ideen den Entwickler/Konstrukteur mental zu entlasten und auch eine Basis für die Kommunikation mit sich selbst und mit anderen zu schaffen. Häufig werden dazu Skizzen auf Papier eingesetzt. Ein großer Vorteil von Skizzen ist deren Potenzial, neben konkreten Abmessungen auch abstrakte und unscharfe Informationen festhalten zu können. Ein weiterer Vorteil ist ihre universelle und unmittelbare Verfügbarkeit. Sind ein Stift und ein beschreibbares Medium vorhanden, kann ohne mentale Belastung sofort mit der Erstellung einer Skizze begonnen werden. Auf der Basis der skizzierten Ideen kann die Lösungsidee weiter ausgearbeitet werden bis schließlich sämtliche Maße und fertigungsrelevanten Eigenschaften in einer Fertigungszeichnung festgelegt sind.

In der Regel werden heutzutage Fertigungszeichnungen von digitalen Produktmodellen abgeleitet. Diese Modelle werden oft ausgehend von Papierskizzen angelegt und in anschließenden Arbeitsschritten konkretisiert, bis alle für die Fertigung relevanten Parameter definiert sind. Betrachtet man rückblickend die ersten rechnerbasierten Systeme zur Geometriemodellierung, waren diese kaum mehr als elektronische Zeichenbretter. Der wesentliche Vorteil im Vergleich zur papiergestützten Zeichnungserstellung lag in der leichten Änderbarkeit und Kopierbarkeit der Geometriemodelle. Aktuelle CAD-Systeme haben eine erheblich erweiterte Funktionalität und verwalten dreidimensionale Geometriemodelle, die aus beliebigen Blickwinkeln dargestellt werden können.

CAD-Systeme stellen zusammen mit den damit eng verknüpften PDM-Systemen die zentrale Instanz zur Geometriedatenbearbeitung und -speicherung dar. Für Prozesse, die der CAD-Modellerstellung vorgelagert (z. B. Design) oder nachgelagert (z. B. FEM, Virtual Reality, CAM) sind, gibt es geeignete Import- und Export-Schnittstellen. Bedient werden CAD-Systeme über Maus und Tastatur. Für Navigationszwecke gibt es auch spezielle Eingabegeräte, die die drei translatorischen und drei rotatorischen Freiheitsgrade erfassen. Die Darstellung der digitalen Geometriemodelle erfolgt auf Standard-Monitoren oder – beispielsweise bei Besprechungen – mittels Projektoren auf einer Leinwand.

Virtual- und Augmented-Reality-Technologien ermöglichen mittels spezieller Ein- und Ausgabegeräte sowie entsprechender Software die Stereo-Visualisierung dreidimensionaler Geometriedaten und damit eine direkte, intuitive Interaktion mit virtueller Geometrie. Durch die räumliche Darstellung können beispielsweise Design Reviews oder Einbauuntersuchungen bereits vor dem Bau physischer Modelle durchgeführt werden. Existierende Virtual- und Augmented-Reality-Installationen dienen primär der Visualisierung von digitalen Geometriemodellen, die mit anderen Programmen wie beispielsweise CAD-Systemen oder Industrial-Design-Software erstellt wurden. Eine interaktive Modifikation der importierten Modelle und anschließende Rückübertragung zur Weiterverarbeitung im Ursprungssystem ist derzeit noch nicht Stand der Technik.

Digitale Werkzeuge zur Geometriemodellierung sind nicht nur für die Ingenieurwissenschaften ein interessantes Forschungsfeld. Es bestehen viele Berührungspunkte mit anderen Disziplinen, woraus sich die Notwendigkeit interdisziplinärer Forschungsprojekte ableitet. Um beispielsweise kreative Prozesse bei der Lösungsfindung besser zu verstehen und zukünftige Werkzeuge besser an das mentale Modell im Kopf des Entwicklers/Konstrukteurs anzupassen, ist die Unterstützung von Psychologen gefragt. Weitere in diesem Umfeld relevante Disziplinen sind die Ergonomie, die Informatik und die Computergrafik.

1.2 Problemstellung

Trotz der zahlreichen Vorteile und der weiten Verbreitung digitaler Geometriemodellierungswerkzeuge¹ gibt es Situationen in der Produktentwicklung, in denen herkömmliche Verfahren zum Festhalten von Geometrieinformationen wie Papierskizzen bevorzugt werden [PACHE ET AL. 1999]. Offensichtlich weisen digitale Werkzeuge in diesen Situationen erhebliche Schwächen und Nachteile auf, die größer sind als die vorhandenen Vorteile. Gerade in frühen Phasen der Produktentwicklung wirkt der Einsatz digitaler Werkzeuge zur Geometriemodellierung kreativitätshemmend. Dafür sind mehrere Gründe ausschlaggebend:

- **Die Bedienung digitaler Werkzeuge erfolgt nicht intuitiv.**

Bereits für die Modellierung einfacher Geometrien ist ein erheblicher Interaktionsaufwand notwendig, der in keinem Verhältnis zum erzielten Ergebnis steht. Dies erschwert das schnelle Festhalten von Ideen. Die aufwendige Bedienung bindet geistige Kapazität und Konzentration, die für die eigentliche Entwicklungs- bzw. Konstruktionsaufgabe nicht zur Verfügung steht. Möchte man beispielsweise einfach schnell ein Wirkprinzip festhalten, wird man dafür kaum ein CAD-System verwenden.

- **Bei digitalen Werkzeugen sind Handlungs- und Wahrnehmungsraum getrennt.**

In den meisten Fällen werden Geometriemodellierungswerkzeuge mit Maus und Tastatur bedient und das digitale Modell auf einem Monitor dargestellt. Die räumliche Distanz zwischen Handlungsraum (Mauspad) und Wahrnehmungsraum (Monitor) sowie die unterschiedliche Orientierung im Raum (Maus: horizontal – Monitor: vertikal) erschweren Tätigkeiten wie das Freihandzeichnen. Beim Zeichnen auf Papier können die zeichnende Hand und die erzeugte Linie gleichzeitig betrachtet werden, wodurch eine erheblich exaktere motorische Steuerung möglich ist.

- **Digitale Werkzeuge erfordern die Modellierung mit exakten Maßen.**

Um Geometrieinformationen in einem Rechnerwerkzeug abbilden zu können, ist die Eingabe von exakten Maßen erforderlich. Gerade in frühen Phasen der Produktentwicklung liegen die entsprechenden Informationen noch nicht in der nötigen Exaktheit vor bzw. sind für das Skizzieren beispielsweise eines Wirkprinzips nicht relevant. Die Modellierung einer nur vage in Gedanken vorliegenden Idee führt somit zu einem digitalen Modell, dessen Maße nur eine vermeintliche Exaktheit haben, die nicht dem wirklichen Stand der gedanklichen Ausarbeitung entspricht.

¹ Darunter werden Systeme verstanden, die speziell für die Modellierung von Produktgeometrien entwickelt wurden. Der im Folgenden verwendete Begriff „digitale Werkzeuge“ bezieht sich auf solche Systeme. Beispiele sind CAD-Systeme oder Industrial Design Software, jedoch nicht einfache Mal- oder Skizziersysteme.

- **Der Einsatz digitaler Werkzeuge erschwert die Kommunikation.**

Papierskizzen werden gerne als kommunikationsunterstützendes Mittel eingesetzt um die eigenen Gedanken mit anderen diskutieren zu können. Digitale Werkzeuge besitzen im Vergleich zu Papier und Stift eine eingeschränkte Mobilität, einen höheren Platzbedarf und sind zudem erst nach einer gewissen Startzeit verfügbar. Dadurch ist ein spontaner Einsatz an beliebigen Orten nicht möglich. Ein Ersetzen von Papierskizzen in Kreativsituationen, insbesondere beim Einsatz der Galeriemethode oder der Methode 6-3-5, durch aktuelle digitale Werkzeuge wäre mit enormem Zusatzaufwand verbunden und damit nicht praktikabel.

Digitale Modellierungswerkzeuge stoßen aus den genannten Gründen offensichtlich in frühen Entwicklungsphasen sowie in Situationen, in denen Kreativität und Kommunikation gefragt sind, an ihre Grenzen. Der daraus resultierende parallele Einsatz von Papierskizzen zur Geometriemodellierung ist aber auch mit Nachteilen verbunden:

- **Der Medienbruch beim Übergang zu digitalen Werkzeugen bedeutet zusätzlichen Aufwand.**

Um skizzierte oder in physischen Modellen festgehaltene Geometrieinformationen in digitalen Werkzeugen weiter ausarbeiten zu können, ist eine Übertragung in ein digitales Format erforderlich. Dazu ist in der Regel eine erneute, manuell durchzuführende Modellierung notwendig. Diese kann auch mehrfach erforderlich sein, wenn beispielsweise Korrekturen mit Stift auf ausgedruckten CAD-Modellen vorgenommen werden und dann ins CAD-Modell übertragen werden müssen. Die gleichzeitige Verfügbarkeit verschiedener Medien kann auch dazu führen, dass parallel gearbeitet wird, da der richtige Zeitpunkt für den Umstieg auf das digitale Werkzeug nicht einfach identifizierbar ist. Lösungsansätze, die eine automatisierte Übertragung beispielsweise durch Scannen und Vektorisieren vorsehen, minimieren den Aufwand kaum, da das Ergebnis kontrolliert und ggf. nachbearbeitet werden muss. Der Medienbruch bietet andererseits auch Chancen, da durch die manuelle Übertragung eine kritische Reflexion und ggf. eine Neuinterpretation der eigenen Skizze angestoßen wird.

- **Papierskizzen sind zweidimensional.**

Bei der Verwendung des Mediums Papier ist der Entwickler/Konstrukteur gezwungen, seine Ideen ausschließlich in zwei Dimensionen festzuhalten. Die Abbildung dreidimensionaler Geometrien auf einem zweidimensionalen Medium erfordert die Anwendung geeigneter Darstellungstechniken. Neben der Verwendung von mehreren Ansichten wie z. B. Draufsicht (Grundriss), Vorderansicht (Aufriss) und Seitenansicht (Seitenriss) sowie

Schnittdarstellungen können auch perspektivische Darstellungen² eingesetzt werden. Der Transfer der gedanklichen Vorstellungen eines dreidimensionalen Produkts in eine zweidimensionale Darstellung erfordert entsprechendes Können. Je nach Veranlagung, Ausbildung und Übung ist die Fähigkeit, z. B. intuitiv eine korrekte perspektivische Darstellung zu zeichnen, unterschiedlich stark ausgeprägt. Zudem benötigt die Umcodierung geistige Kapazität, die in diesem Moment nicht zur Problemlösung zur Verfügung steht.

- **Papierskizzen entziehen sich der Verwaltung durch EDM/PDM-Systeme.**

Die in Papierskizzen festgehaltenen Ideen werden in der Regel individuell abgelegt und verwaltet. Erst nach dem Transfer in ein CAD-System besteht die Möglichkeit der Ablage im zentralen Datenmanagementsystem. CAD-Modelle enthalten jedoch meistens nur die reinen Geometrieinformationen – zusätzliche auf Skizzen festgehaltene Informationen wie Anmerkungen, Kommentare, Berechnungen oder Konzeptalternativen gehen somit verloren.

In vielen Bereichen konnten digitale Werkzeuge zur Geometriemodellierung das papierbasierte Modellieren ablösen und eröffnen Möglichkeiten, die zuvor nicht realisierbar waren. Dennoch gibt es noch keinen durchgängigen Prozess der digitalen Geometriemodellierung. Vor allem in der frühen Phase ist das Festhalten von Geometrieinformationen – egal ob auf Papier oder mit einem digitalen Medium – mit Einschränkungen verbunden.

1.3 Handlungsbedarf

Die Unterstützung der Geometriemodellierung in frühen Phasen durch digitale Werkzeuge ist derzeit unzureichend gelöst. Es besteht ein Defizit an geeigneten Systemen, deren Funktionalität und Bedienung auf die Anforderungen der frühen Phasen zugeschnitten ist. Damit setzt die digitale Modellierung von Geometrieinformationen erst zu einem recht späten Zeitpunkt ein. Wünschenswert wäre jedoch eine durchgängige digitale Prozesskette der Geometriedefinition in der Produktentwicklung (Abbildung 1-1). Eine Rechnerunterstützung bereits bei der kreativen Generierung von Lösungskonzepten hätte den Vorteil, dass Informationen aus frühen Phasen, die momentan nur in Papierform vorliegen, einfach über ein PDM-System verwaltet und leicht zugänglich gemacht werden könnten und nicht erst eingescannt werden müssten. Medienbrüche und damit verbundener Aufwand würden vermieden und es könnten die Vorteile digitaler Geometriedatenverarbeitung von Anfang an genutzt werden.

² Unter perspektivischen Darstellungen werden alle Möglichkeiten verstanden, dreidimensionale Objekte auf einer zweidimensionalen Fläche so abzubilden, dass dennoch ein räumlicher Eindruck entsteht. Beispiele sind die isometrische Projektion, die axonometrische Darstellung und die Zentralperspektive.

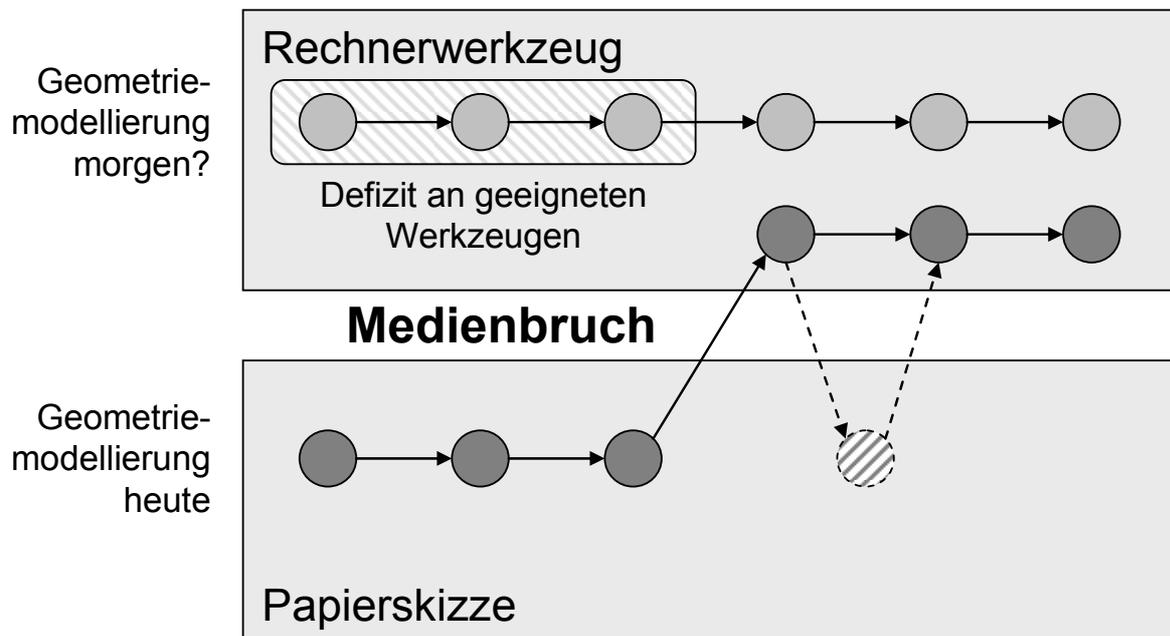


Abbildung 1-1: Medienbruch statt durchgängiger digitaler Prozesskette in der Geometriemodellierung

Um eine durchgängige digitale Geometriemodellierung im Produktentwicklungsprozess zu realisieren, werden neue innovative Modellierungswerkzeuge benötigt, die sowohl die Vorteile digitaler Werkzeuge als auch die von Papierskizzen aufweisen, ohne dabei die bestehenden Nachteile zu besitzen. Es besteht Handlungsbedarf, derartige digitale Werkzeuge zu entwickeln, entweder als Weiterentwicklung bestehender Systeme oder als Neuentwicklung.

Ein wesentlicher Faktor für den Erfolg solcher Werkzeuge wird deren leichte Bedienbarkeit sein. Ein intuitives Bedienkonzept ermöglicht Modellieren ohne aufwendige Interaktion. Dabei soll nicht nur die Funktionalität der Papierskizze nachgeahmt werden, sondern die Möglichkeit von Rechnersystemen, Geometriedaten dreidimensional zu verwalten, direkt bei der Eingabe genutzt werden. Dies würde die Umcodierung der Gedanken in eine zweidimensionale Darstellungsform überflüssig machen und damit den kreativen Problemlösungsprozess nicht behindern. Für die Realisierung einer dreidimensionalen Eingabeschnittstelle ohne Trennung von Handlungs- und Wahrnehmungsraum könnten Technologien, wie sie in heutigen Virtual- und Augmented-Reality-Systemen eingesetzt werden, zum Einsatz kommen.

Neben der Bedienbarkeit wird die Fähigkeit, unscharfe Geometrieinformationen verarbeiten zu können, eine Grundvoraussetzung für den erfolgreichen Einsatz zukünftiger Geometriemodellierungswerkzeuge in frühen Entwicklungsphasen sein. Auch ohne die Angabe exakter Maße muss es möglich sein, Geometrieinformationen festzuhalten und diese erst in späteren Arbeitsschritten ohne Übertrag in ein anderes System zu konkretisieren. Anmerkungen, Beschriftungen, Bewegungspfeile und ähnliche Elemente üblicher Papierskizzen, die Informati-

onen auf einer höheren Abstraktionsebene darstellen, sollen ebenfalls verwendet werden können.

Virtual- und Augmented-Reality-Technologien bieten ein großes, bisher ungenutztes Potenzial nicht nur für die Unterstützung der Geometriemodellierung in frühen Phasen. Vorstellbar ist die Verschmelzung von CAD- und Virtual-Reality-Systemen zu einer integrierten Lösung für die Generierung und Visualisierung virtueller dreidimensionaler Geometrie in allen Phasen der Produktentwicklung (Abbildung 1-2).

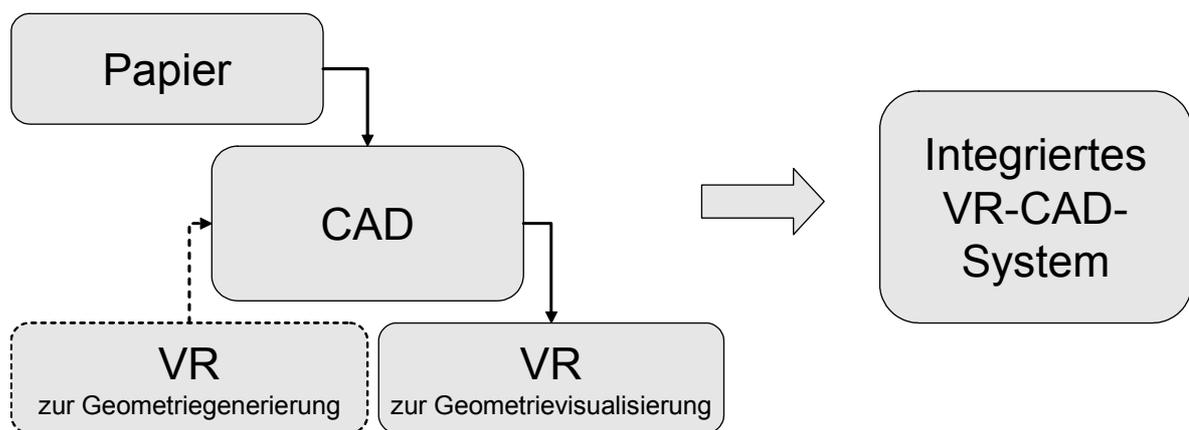


Abbildung 1-2: Verschmelzung von Papier, CAD und Virtual Reality (VR) zu einer integrierten Lösung

Die Vision, die dieser Arbeit zu Grunde liegt, ist ein vollständig digitaler Produktentwicklungsprozess ohne Medienbrüche auf Basis eines integrierten VR-CAD-Systems. Die Bedienung eines derartigen visionären Systems ist intuitiv und situationsangepasst. Der Übergang vom Unschaffen zum Konkreten wird durch intelligente Softwareassistenten unterstützt, ohne den Entwickler/Konstrukteur zu bevormunden. Diese Arbeit soll einen Beitrag zur Erreichung dieser Vision leisten.

1.4 Zielsetzung dieser Arbeit

Die Entwicklung eines intuitiv zu bedienenden Rechnerwerkzeugs zur Geometriemodellierung, das mit unscharfen Geometrieinformationen umgehen und anstelle von Papierskizzen eingesetzt werden kann, ist ein ehrgeiziges Vorhaben. Dessen Realisierung ist mit einem hohen Aufwand an Ressourcen und Zeit verbunden. Mit dieser Arbeit wird ein erster Schritt in diese Richtung gemacht, in dem grundlegende Erkenntnisse als Basis für die Entwicklung zukünftiger Rechnerwerkzeuge zur Geometriemodellierung erarbeitet werden.

Basis dieser Arbeit ist die Hypothese, dass digitale Werkzeuge zur Modellierung unscharfer Geometrieinformationen in frühen Phasen Vorteile gegenüber herkömmlichen Papierskizzen

haben und einen Beitrag zur Optimierung von Produktentwicklungsprozessen leisten. Daraus lassen sich die Ziele dieser Arbeit ableiten. Folgende Ziele sollen verfolgt werden:

- Aufzeigen der Einsatzmöglichkeiten von digitalen Werkzeugen zur Geometriemodellierung in frühen Entwicklungsphasen
- Erlangen von Erkenntnissen über den rechnergestützten Umgang mit unscharfen Geometrieinformationen
- Aufzeigen von Vor- und Nachteilen, Potenzialen und Grenzen von Werkzeugen zur digitalen Modellierung unscharfer Geometrieinformationen

Um diese Ziele zu erreichen und die Richtigkeit der Hypothese überprüfen zu können, soll ein prototypisches Werkzeug zur Modellierung unscharfer Geometrieinformationen entwickelt werden. Dieses dient als Basis für Experimente um praktische Erfahrungen sammeln zu können und damit Aussagen über die Eignung derartiger zukünftiger Systeme hinsichtlich verschiedener Einsatzmöglichkeiten treffen zu können.

1.5 Aufbau der Arbeit

Der Aufbau der Arbeit orientiert sich an der im vorangegangenen Kapitel erläuterten Zielsetzung und ist in Abbildung 1-3 dargestellt.

Zunächst wird in **Kapitel 2** auf den aktuellen Stand der Forschung und Technik hinsichtlich Geometriemodellierung in frühen Entwicklungsphasen detailliert eingegangen. Bedingt durch die interdisziplinäre Themenstellung wird in verschiedenen Teilkapiteln auf relevante Erkenntnisse aus den Bereichen Produktentwicklung zu Prozess- und Produktmodellen, Psychologie zu kreativen Mechanismen beim Skizzieren sowie Computergraphik zu Rechnerwerkzeugen für die Geometriemodellierung eingegangen. Aufbauend auf einer Analyse dieser Erkenntnisse wird Forschungsbedarf abgeleitet.

Das **Kapitel 3** beschäftigt sich konkret mit der Thematik dreidimensionales Skizzieren. Im ersten Teilkapitel werden verschiedene mögliche Einsatzszenarien erarbeitet, bewertet und ein viel versprechendes ausgewählt. Dieses dient als Basis für die im zweiten Teilkapitel beschriebene Entwicklung und prototypische Realisierung eines Werkzeugs zur Erzeugung dreidimensionaler Skizzen. Die damit gemachten praktischen Erfahrungen im Rahmen von Experimenten und Demonstrationen sind Inhalt des dritten Teilkapitels.

Kapitel 4 baut auf den praktischen Erfahrungen mit dem prototypischen 3D-Skizzierwerkzeug auf und beschreibt davon abgeleitete Ansätze zur Weiterentwicklung. Dies sind zum einen konkrete Konzepte, die kurzfristig realisiert werden können und die Themengebiete Bedienkonzepte und Konkretisierungsprozess behandeln. Zum anderen werden Kon-

zepte, Ideen und Visionen beschrieben, die in einem mittel- bis langfristigen Zeithorizont realisiert werden können.

In **Kapitel 5** werden die im Rahmen dieser Arbeit erarbeiteten Ergebnisse nochmals zusammengefasst und ein kurzer Ausblick auf erstrebenswerte Weiterentwicklungen von digitalen Werkzeugen zur Geometriemodellierung gegeben.



Abbildung 1-3: Aufbau der Arbeit

2 Stand der Forschung und Technik

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über den aktuellen Stand der Forschung und Technik hinsichtlich der Geometriemodellierung in frühen Entwicklungsphasen. Nach einer Einordnung des Themas dieser Arbeit in bestehende Prozess- und Produktmodelle wird auf die psychologischen Grundlagen der Geometriemodellierung, insbesondere auf kreative Mechanismen beim Skizzieren eingegangen. Anschließend werden aktuelle Rechnerwerkzeuge und die zugrunde liegenden Technologien, Bedienkonzepte und Datenmodelle zur Geometriemodellierung vorgestellt und hinsichtlich ihrer Eignung für den Einsatz in frühen Phasen der Produktentwicklung bewertet. Basierend darauf wird Forschungsbedarf identifiziert und der konkrete Forschungsansatz dieser Arbeit vorgestellt.

2.1 Prozess- und Produktmodelle

Es existiert eine Reihe von Modellen des Produktentwicklungsprozesses, die bei der Planung von Entwicklungsprozessen helfen und dem Entwickler/Konstrukteur Orientierung bieten sollen. Dieses Teilkapitel dient dazu darzustellen, wie Produktentwicklungsprozesse strukturiert werden können und was frühe Phasen auszeichnet, für die in dieser Arbeit ein Optimierungsbedarf hinsichtlich der Unterstützung durch digitale Werkzeuge zur Geometriemodellierung identifiziert wurde. In diesem Zusammenhang wird auch auf die während des Entwicklungsprozesses erzeugten verschiedenen Produktrepräsentationen und die damit verknüpften Produktmodelle eingegangen.

In der Produktentwicklung gibt es unterschiedliche Forschungsfelder, die stark miteinander vernetzt sind. Primär geht es um die Themen Prozesse, Methoden und Hilfsmittel, aber auch um Menschen und Situationen (siehe Abbildung 2-1). Die Inhalte dieser Arbeit lassen sich nicht eindeutig einem dieser fünf Felder zuordnen. Schwerpunkt ist das Feld Hilfsmittel, wobei es starke Vernetzungen zu den Feldern Mensch und Prozesse gibt.

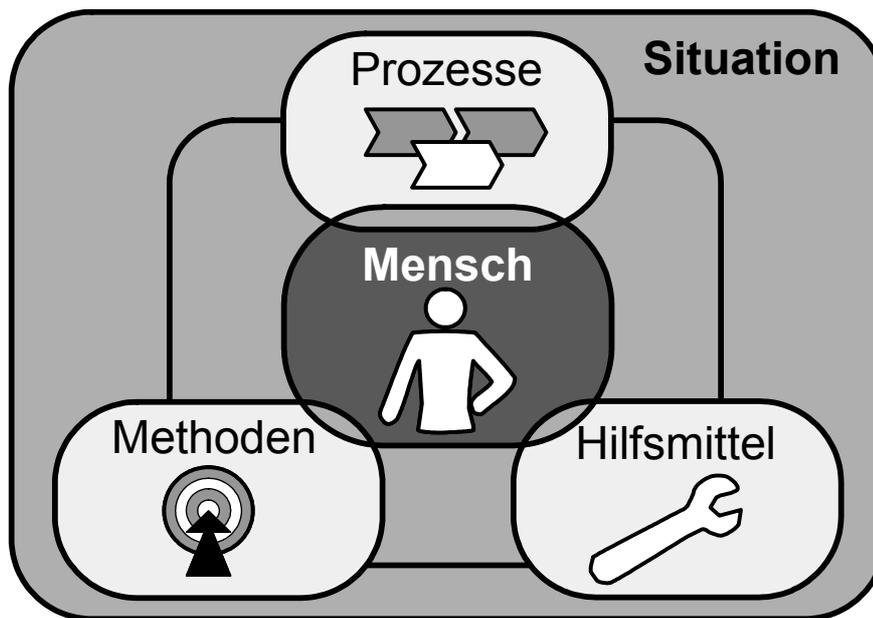


Abbildung 2-1: Forschungsfelder in der Produktentwicklung

Betrachtet man die Modelle des Entwicklungsprozesses hinsichtlich des Themas dieser Arbeit, so stellt sich die Frage, an welchem Punkt mit der Geometriemodellierung begonnen wird. Ein zweiter in diesem Zusammenhang interessanter Punkt ist der des Übergangs von der unscharfen Geometriemodellierung zur scharfen bzw. exakten Geometriemodellierung. Genau so wie die einzelnen Phasen von Entwicklungsprozessmodellen nicht exakt voneinander zu trennen sind, ist auch keine exakte Zuordnung der beiden oben genannten Punkte, die das Gebiet dieser Arbeit abgrenzen, möglich. Im Folgenden wird das Thema dieser Arbeit in ausgewählte Prozessmodelle eingeordnet.

Eine weit verbreitete Strukturierung des Produktentwicklungsprozesses findet sich bei Pahl und Beitz [PAHL & BEITZ 2005]. Vier wesentliche Phasen werden hier unterschieden:

- Planen und Klären der Aufgabe
- Konzipieren
- Entwerfen
- Ausarbeiten

Hier kann man die Modellierung unscharfer Geometrieinformationen gut einordnen. Auch wenn in der Phase Planen und Klären der Aufgabe Anforderungen geometrischer Art festgelegt werden, wird selten bereits in dieser Phase mit Skizzen oder ähnlichem gearbeitet. Die Phase Konzipieren beinhaltet die prinzipielle Festlegung einer Lösung. Meist ist hier der Einsatz einfacher Skizzen hilfreich. Beim Entwerfen geht es dann um die gestalterische Festlegung einer Lösung. Alle wichtigen geometrischen Maße werden grob festgelegt. Die beiden

letztgenannten Phasen – Konzipieren und Entwerfen – werden von dieser Arbeit adressiert, da hier die Notwendigkeit besteht, Geometrie zu modellieren, die allerdings noch mit Unschärfen behaftet ist. Die abschließende Phase Ausarbeiten dient dazu, die unscharfen Geometrieinformationen zu konkretisieren und zu detaillieren. Ziel ist es, sämtliche fertigungsrelevanten Parameter festzulegen. Dazu gehören nicht nur die geometrischen Maße, sondern auch beispielsweise Toleranzen, Oberflächenangaben und Werkstoffe. Die VDI-Richtlinie 2221 [VDI 1993] ist eine detaillierte Beschreibung dieses Prozesses (Abbildung 2-2).

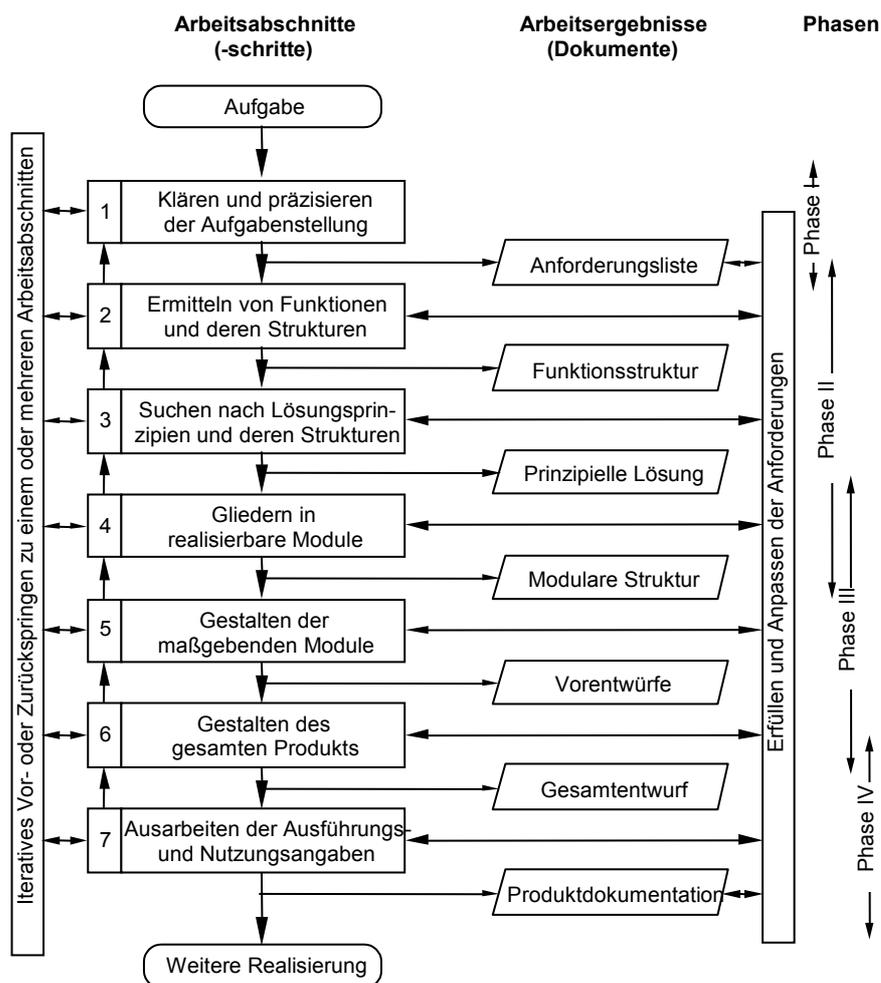


Abbildung 2-2: VDI-Richtlinie 2221

Betrachtet man die Vorgehensmodelle von Pahl und Beitz, ROTH [2000] und die VDI-Richtlinie 2221, kann man folgende abgrenzbaren Konkretisierungsebenen für Produktrepräsentationen erkennen: Funktion, Physik und Gestalt. EHRENSPIEL [2003] leitet daraus eine hierarchische Modellierung von technischen Systemen ab und ergänzt sie um den Bereich der Produktion (Abbildung 2-3). Verglichen mit den vier Phasen nach Pahl und Beitz wird hier nicht auf den Bereich der Anforderungsklä rung eingegangen, dafür werden Funktion und Physik getrennt betrachtet.

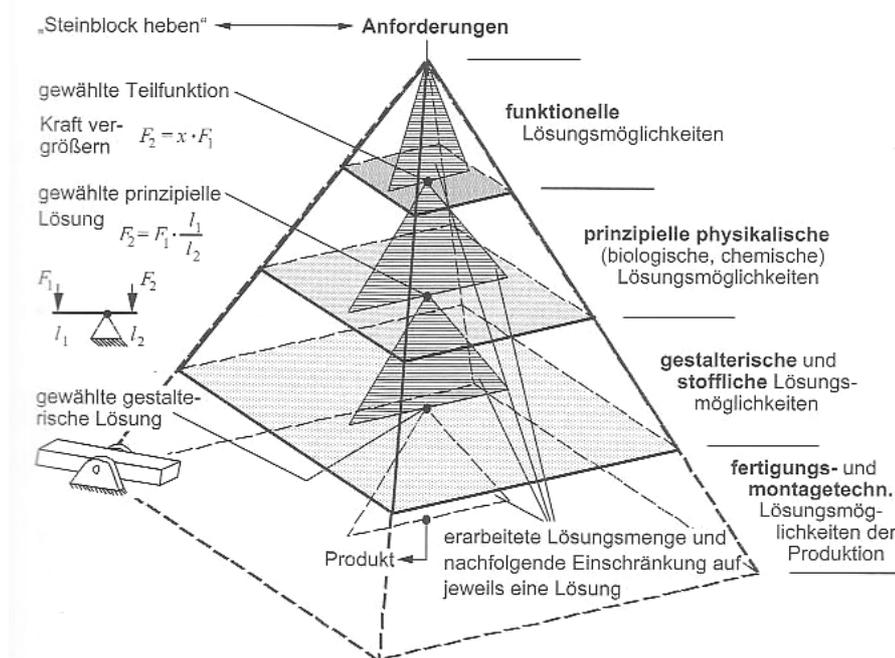


Abbildung 2-3: Hierarchische Modellierung von technischen Systemen nach EHRENSPIEL [2003]

Wie man am Beispiel „Steinblock heben“ aus Abbildung 2-3 gut erkennen kann, beginnt die Geometriemodellierung bereits bei den prinzipiellen Lösungen. Diese haben zwar noch keine Gestalt, stellen aber bereits die geometrischen Parameter aus den Formelzusammenhängen der zu Grunde liegenden physikalischen Effekte in einfachen Skizzen dar. Im Gegensatz zu detaillierten Skizzen und Fertigungszeichnungen werden hier auch nicht-geometrische Parameter wie z. B. Kräfte oder Materialeigenschaften dargestellt. Auf der Ebene der funktionellen Lösungsmöglichkeiten wird die Aufgabe abstrakt betrachtet und es besteht kein Bedarf für geometrische Festlegungen. Ein Ansatz, abstrakte Funktionsmodellierung mit Geometrieinformationen zu verknüpfen ist die Zuweisung dreidimensionaler Hüllgeometrien zu den einzelnen Funktionen [KOCH 2003]. Diese Hüllgeometrien geben allerdings lediglich einen Rahmen für das zu gestaltende Bauteil (bzw. Baugruppe) vor und eignen sich vornehmlich für Problemstellungen, die mit einer flussorientierten Funktionsstruktur [wie z. B. nach EHRENSPIEL 2003] dargestellt werden können.

Für das Thema dieser Arbeit am interessantesten ist die Ebene der gestalterischen und stofflichen Lösungsmöglichkeiten. In dieser Phase werden anfänglich sehr vage bzw. unvollständige Geometrieinformationen kontinuierlich konkretisiert, wobei das Ergebnis noch nicht die vollständige Beschreibung der Geometrie eines zu fertigenden Produkts beinhaltet. Dies geschieht erst in der darauf folgenden Ebene der fertigungs- und montage technischen Lösungsmöglichkeiten der Produktion.

Die bisher betrachteten Modelle stellen das zu entwickelnde Produkt in den Mittelpunkt. Sie beschäftigen sich mit der Fragestellung „Was wird festgelegt?“. Daneben existieren Modelle, die den Menschen im Mittelpunkt haben und sich mit der Fragestellung „Wie wird festgelegt?“ beschäftigen [EHRENSPIEL 2003]. An dieser Stelle sei exemplarisch das Münchener Vorgehensmodell (MVM) nach LINDEMANN [2005] genannt. Dieses Modell wurde auf Basis der Vorgehensmodelle von DAENZER [2002], EHRENSPIEL [2003] und ALTSCHULLER [1986] sowie diverser Forschungsprojekte gemeinsam mit Psychologen entwickelt und berücksichtigt Erfahrungen aus der industriellen Anwendung. Es gibt sieben Schritte als Elemente, die in Form eines Netzwerkes dargestellt werden (Abbildung 2-4). Dies erlaubt eine bessere Abbildung realer, sprunghafter Verläufe als es herkömmliche lineare Darstellungen tun.

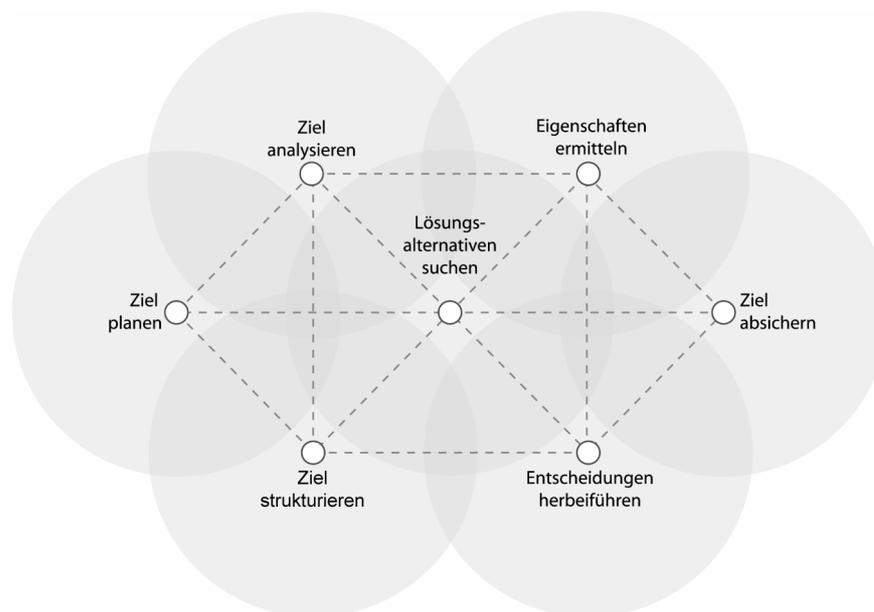


Abbildung 2-4: Das Münchener Vorgehensmodell (MVM) nach LINDEMANN [2005]

Der Schritt „Lösungsalternativen suchen“ ist das zentrale Element und beinhaltet das Generieren neuer Lösungen sowie das Ergänzen und Ändern vorhandener Lösungen. Dies geht zwangsläufig einher mit einer Festlegung der Gestalt und damit der beschreibenden Geometrieparameter. Je nachdem in welchem Rahmen man das MVM betrachtet, kann es sich bei der modellierten Geometrie sowohl um eine einfache Skizze als auch um auskonstruierte CAD-Modelle handeln. Aber auch im Schritt „Eigenschaften ermitteln“ können Werkzeuge zur Geometriemodellierung eingesetzt werden. Beispielsweise kann man durch die Darstellung von verschiedenen Bewegungszuständen und der diese verbindenden Bewegungskurven auf einer Papierskizze sehr schnell überprüfen, ob die angedachte Lösung überhaupt den Packeanforderungen entspricht.

Für Betrachtungen zum Thema Geometriemodellierung eignen sich die produktbezogenen Vorgehensmodelle besser als die menschenbezogenen, da bei den Erstgenannten verschiedene Phasen der Geometriefestlegung mit unterschiedlichen Graden der Abstraktion bzw. Konkretisierung unterschieden werden. Auf eine andere Art spielt der Faktor Mensch dennoch auch hier hinein, denn der Prozess des Entwickelns wird in den seltensten Fällen von einer Person alleine durchgeführt. In vielen Unternehmen wird es so gehandhabt, dass ein Konzeptingenieur Skizzenvorlagen macht, die dann von einem CAD-Konstrukteur detailliert werden.

Im Verlauf eines Produktentwicklungsprozesses wird eine Produktbeschreibung erarbeitet, die die Basis für die spätere Fertigung des Produktes darstellt. Diese Beschreibung wird auch Produktmodell oder Produktrepräsentation genannt. Ein Produktmodell enthält nach SPUR & KRAUSE [1997] nicht nur die geometrischen Daten, die für die Fertigung erforderlich sind, sondern kann auch beliebige nicht-geometrische Informationen beinhalten. So ist beispielsweise die Anforderungsliste auch ein Teil eines Produktmodells. Betrachtet man die Arbeitsergebnisse der einzelnen Phasen in der VDI-Richtlinie 2221, so werden anfänglich Dokumente wie die Anforderungsliste und die Funktionsstruktur erarbeitet, die keine geometrische Modellierung darstellen. Mit den prinzipiellen Lösungen beginnt der Prozess der Geometriefestlegung. Die Zahl der festgelegten geometrischen Parameter steigt mit jedem Schritt, bis am Schluss ein fertigungsgerechtes Produktmodell vorliegt. In der industriellen Praxis werden die Arbeitsergebnisse in der Regel abweichend vom beschriebenen Vorgehen erstellt und beispielsweise geometrische Festlegungen bereits während der Erstellung der Anforderungsliste getroffen und auf Skizzen festgehalten.

Oft wird der Begriff Produktmodell auch rein auf Geometrieinformationen bezogen verwendet. Hierbei lassen sich weitere Unterscheidungen treffen: neben Papierskizzen existieren physische und virtuelle Modelle. In dieser Arbeit wird die digitale Modellierung, also der Aufbau von virtuellen Modellen, betrachtet. Allerdings können der Umgang mit Papierskizzen und physischen Modellen wertvolle Anregungen für den rechnergestützten Umgang mit unscharfen Geometrieinformationen in frühen Entwicklungsphasen geben.

Die virtuellen Produktmodelle unterscheiden sich nach der Art und dem Umfang der darin gespeicherten Informationen. Betrachtet man nur die Geometriedarstellung, lassen sich 2D- und 3D-Modelle unterscheiden. Darüber hinaus gibt es virtuelle Modelle, die auch nicht-geometrische Informationen abbilden, beispielsweise physikalische Informationen oder Kosten.

2.2 Psychologie des Skizzierens

In diesem Teilkapitel wird auf die psychologischen Grundlagen des Skizzierens eingegangen. Durch die Zusammenarbeit von Psychologen und Ingenieuren werden Erkenntnisse gewon-

nen, die die Denkprozesse bei der Produktentwicklung transparenter machen und Grundlage für die Weiterentwicklung von Methoden und Werkzeugen sind. „Sketches are thinking tools“³ – dieser Ausspruch von Professor Hacker⁴ auf der Konferenz „Human Behaviour in Design 2003“ zeigt schon die enge Verknüpfung zwischen den Disziplinen der Psychologie und der Ingenieurwissenschaften.

Im Folgenden wird auf allgemeine Mechanismen des kreativen Denkens und des Problemlösens eingegangen. Diese unterstützende Werkzeuge und Medien werden anschließend am Beispiel des Skizzierens vertieft behandelt.

2.2.1 Kreative Mechanismen beim Problemlösen

Dieses Teilkapitel setzt sich mit den psychologischen Hintergründen beim Problemlösen und den damit verbundenen kreativen Mechanismen auseinander. Der aktuelle Stand der Erkenntnisse bezüglich der Vorgänge im Gedächtnis beim Problemlösen wird vorgestellt. Basierend auf einem besseren Verständnis dieser Vorgänge lassen sich darauf hin optimierte Werkzeuge entwickeln. Als Grundlage für die Ausführungen in diesem Teilkapitel sollen zunächst einmal einige grundlegende Begriffe geklärt werden:

Was ist eigentlich Kreativität? Nach EHRENSPIEL [2003] ist Kreativität „die Fähigkeit des Menschen, Ideen, Konzepte, Kombinationen und Produkte hervorzubringen, die in wesentlichen Merkmalen neu sind und dem Bearbeiter vorher unbekannt waren“. Definitionen aus der Psychologie ergänzen den Neuheitscharakter von Ergebnissen aus kreativen Prozessen um die Eigenschaft der Nützlichkeit [HUSSY 1984, DÖRNER 1987A], die im technischen Umfeld die Erfüllung von Anforderungen an das zu entwickelnde Produkt darstellt. Als wesentlich für die Anwendung im Ingenieurumfeld ist das Finden neuer Kombinationen aus bekannten Grundelementen anzusehen, mit denen es möglich ist, neue Funktionen zu realisieren. Auch wenn beispielsweise von einem Ingenieurdienstleister aufgrund von restriktiven Vorgaben keine grundlegend neuen Lösungskonzepte zu erwarten sind, so ist dennoch für die Lösung von Detailaufgaben Kreativität vonnöten [PACHE 2003]. Allgemein betrachtet ist Kreativität für jede Phase in Produktentwicklungsprozessen nötig.

Ein weiterer Begriff, der im Zusammenhang mit kreativem Problemlösen geklärt werden muss, ist der des Problems. Was wird eigentlich unter einem Problem verstanden? Nach DÖRNER [1987A] liegt ein Problem dann vor, wenn ein unerwünschter Zustand vorliegt und

³ engl. – deutsche Übersetzung: „Skizzen sind Denkwerkzeuge“

⁴ Winfried Hacker ist Professor für allgemeine Psychologie und beschäftigt sich u. a. mit denkpsychologischen Grundlagen und Unterstützungsmöglichkeiten des Konstruktionsprozesses

wenn eine wie auch immer geartete Barriere es verhindert, den gewünschten Zustand zu erreichen (Abbildung 2-5).

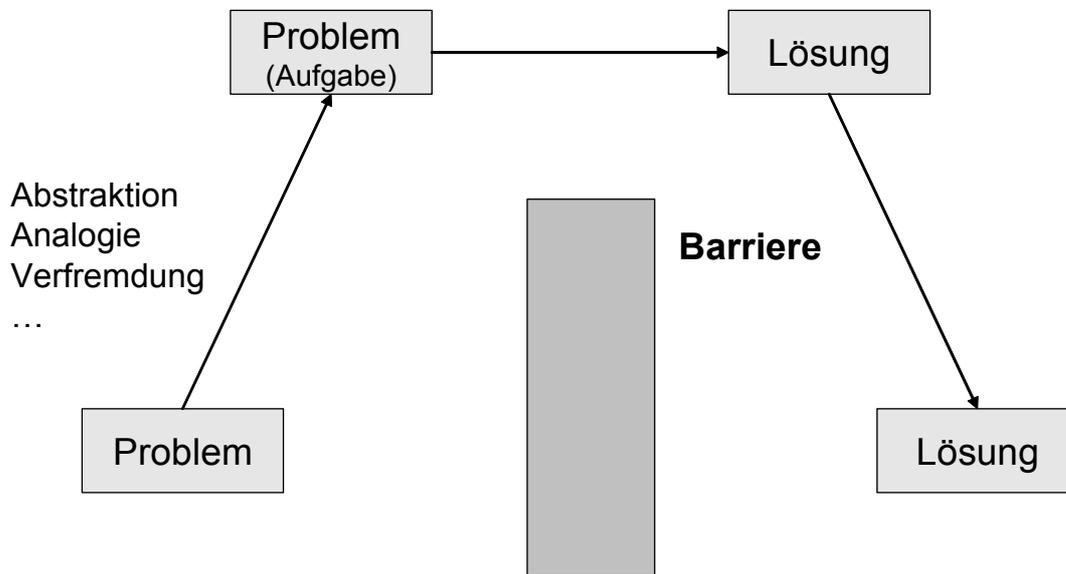


Abbildung 2-5: Barriere zwischen Problem und Lösung nach LINDEMANN [2005]

Dabei kann das Problem hinsichtlich der Klarheit über den gewünschten Zustand sowie hinsichtlich des Bewusstseins über mögliche Wege zur Lösung variieren. In Produktentwicklungsprozessen liegen zwar über eine Anforderungsliste Informationen über den gewünschten Zustand des zu entwickelnden Produkts vor, diese Informationen beschreiben jedoch nicht vollständig dessen Funktionsweise. Auch ist nicht genau bekannt, auf welche Weise dieser Zustand erreicht werden soll. Dadurch unterscheidet sich ein Problem von einer Aufgabe.

Der Prozess des Übergangs vom unerwünschten zum erwünschten Zustand bei zunächst unbekanntem Weg wird als Problemlösen bezeichnet. Dieser Prozess basiert weitestgehend auf der Kombination und Abwandlung von Gedächtnisinhalten und kann, abhängig von der Art des Problems, durch externe Repräsentationsmedien unterstützt werden. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird darauf noch vertieft eingegangen. Um passende Werkzeuge und Medien entwickeln zu können, ist es hilfreich, die Mechanismen, die der gedanklichen Arbeit des Problemlösens zu Grunde liegen, zu kennen. Für die Arbeit an komplexen Problemen empfiehlt DÖRNER [1995], „den (subjektiven) Problemraum zu ändern“. Dazu schlägt er vier Strategien vor:

- Abstrahieren und Rekonkretisieren
- Analyse
- Analogien suchen
- Wechsel der Codierung

Im weiteren Verlauf dieses Kapitels werden diese Strategien noch genauer betrachtet. Um die Wirkungsweise dieser Strategien besser zu verstehen, wird zunächst in einem kleinen Exkurs auf das menschliche Gedächtnis und auf das mentale Modell des zu bearbeitenden Problems bzw. dessen Lösung eingegangen.

Was geht eigentlich im Kopf eines Produktentwicklers/Konstrukteurs vor, wenn er nach Lösungen sucht? Wie ist das mentale Modell im Kopf des Entwicklers aufgebaut? In welcher Art werden Informationen gespeichert und verarbeitet? Für ein besseres Verständnis der Erkenntnisse auf diesem Gebiet werden verschiedene Modelle zur Erklärung des Verhaltens und der Funktionsweise des menschlichen Gedächtnisses betrachtet. Das früher verwendete Mehrebenenmodell [z. B. CRAIK & LOCKHART 1972], gilt seit längerem als überholt. Es geht von einer hierarchischen Reizverarbeitung aus, bei der eingehende Informationen mehrstufig verarbeitet werden und der Grad an kognitiver und semantischer Analyse mit jeder Stufe zunimmt. Differenzen in der Gedächtnisleistung werden auf unterschiedliche Verarbeitungstiefen zurückgeführt. Das Mehrebenenmodell wurde durch das Mehrspeichermodell abgelöst (Abbildung 2-6), welches unterschiedliche Gedächtnisleistungen durch den Zugriff auf verschiedene Gedächtnisspeicher mit unterschiedlichen Eigenschaften erklärt. Im Laufe der Zeit wurden verschiedene Ausprägungen des Mehrspeichermodells entwickelt. Im Folgenden wird auf ausgewählte Modelle, die für Betrachtungen zu Geometriemodellierungsprozessen in frühen Phasen als geeignet und ausreichend angesehen werden, eingegangen.

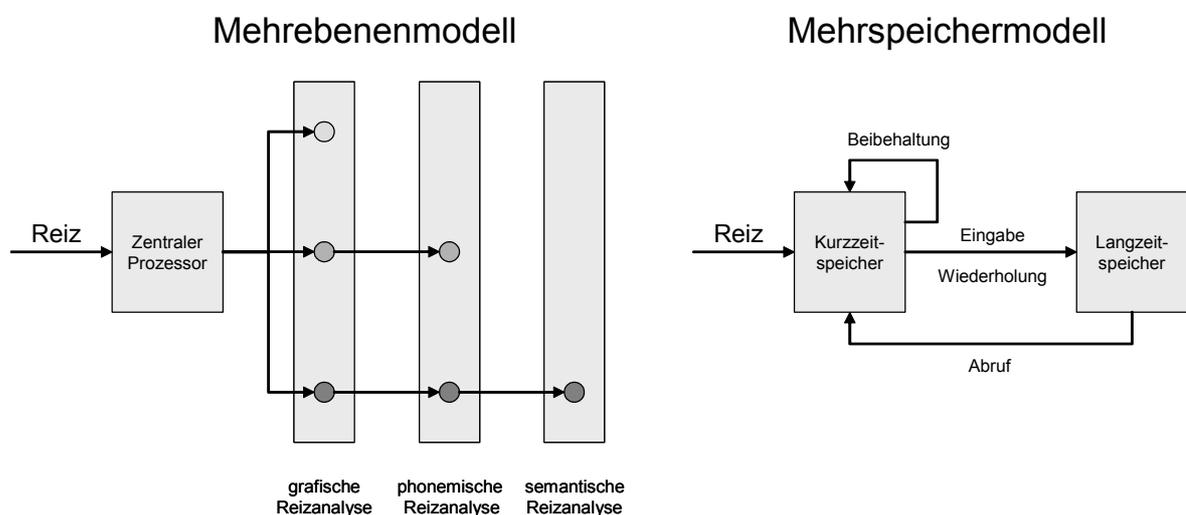


Abbildung 2-6: Mehrebenenmodell und Mehrspeichermodell (in Anlehnung an SCHERMER [1998])

Ein weit verbreitetes und bekanntes Modell ist das Zweispeichermodell, das eine Unterscheidung zwischen Kurzzeit- und Langzeitgedächtnis trifft. Das Kurzzeitgedächtnis kann wiederum in das Ultrakurzzeitgedächtnis, auch sensorisches Register genannt, und das unmittelbare Gedächtnis unterteilt werden. Die beiden Kurzgedächtnisarten unterscheiden sich in der Art

der Informationscodierung: Liegen im sensorischen Register die Informationen den genuinen Reizen entsprechend vor, so sind die Informationen im unmittelbaren Gedächtnis akustisch-artikulatorisch kodiert [BADDELEY 1997]. In diesem Gedächtnisbereich können Informationen zerlegt, verändert und miteinander verknüpft werden. Die Kapazität des unmittelbaren Gedächtnisses, auch als mentale Kapazität bezeichnet, wird mit 7 ± 2 Einheiten, sog. „chunks“ angegeben [MILLER 1956, BOLTZ 2002]. Diese relativ kleine Kapazität reicht selbst für einfache technische Aufgabenstellungen nicht aus und ist der Grund für die Notwendigkeit externer Repräsentationsmedien.

Auch beim Langzeitgedächtnis werden verschiedene Untereinheiten unterschieden [JAFFARD 2002]: das explizite und das implizite Gedächtnis. Das in diesem Zusammenhang interessante explizite Gedächtnis wird wiederum unterteilt in das episodische und das semantische Gedächtnis. Im episodischen Gedächtnis werden Erinnerungen, also quasi die eigene Geschichte, gespeichert, wohingegen das semantische Gedächtnis das eigene Wissen als kontextfreie Informationen in hierarchischen Begriffssystemen speichert. Diese Informationen liegen abstrakt vor und werden bei Bedarf in bildliche oder verbale Informationen umkodiert [BADDELEY 1997].

Ein weiteres Mehrspeichermodell stellt das Modell des Arbeitsgedächtnisses dar: es berücksichtigt Eigenschaften, die mit dem Zweispeichermodell nicht erklärt werden können. So wird auf Grund von Versuchsergebnissen die Beschränkung der Kapazität zumindest für spezielle Aufgabentypen in Frage gestellt [BADDELEY 1997]. Wichtige Elemente des Arbeitsgedächtnisses sind die (noch wenig erforschte) Leitzentrale, die phonologische Schleife und der bildlich-räumliche Notizblock. Die Verarbeitung von bildlichen und sprachlichen Informationen läuft getrennt ab. Bildlich-räumliche Repräsentationen können in sprachliche umgewandelt werden und umgekehrt [HAGENDORF 1995]. Diese beiden Repräsentationsarten haben unterschiedliche Eigenschaften, was sich auch im Sprichwort „Ein Bild sagt mehr als 1000 Worte“ niedergeschlagen hat. Das gleichzeitige Vorhandensein dieser unterschiedlichen Speicherformate und der Wechsel zwischen beiden spielt eine wichtige Rolle bei kreativen Problemlöseprozessen.

Das von Dörner postulierte Protokollgedächtnis ergänzt die bestehenden Ansätze um eine zeitliche Komponente [DÖRNER 1987B]. Im Protokollgedächtnis wird vom kognitiven System ein möglicherweise lückenhaftes Protokoll der zuletzt durchgeführten internen und externen Aktionen angelegt. Dieser Speicher dient der Orientierung in der Zeit und als Basis für die Analyse der eigenen psychischen Prozesse. SCHAUB [1996] vergleicht das Protokollgedächtnis mit einem Videoband, auf dem das Erlebte der letzten Zeit gespeichert ist: „Das Band kann zurückgespult werden (was habe ich gestern Mittag gemacht), es kann vorgespult werden (was habe ich danach gemacht) oder auch auf „Standbild“ geschaltet werden (das muss ich mir noch einmal genauer vergegenwärtigen). Um in der Analogie zu bleiben: Das Ende

dieses Videobandes ist immer der gegenwärtige Zeitpunkt. Leider ist die Bildqualität nur am Ende des Bandes gut, gegen Anfang nimmt die Qualität immer mehr ab.“ Im Gegensatz zum Langzeitgedächtnis besitzt das Protokollgedächtnis eine begrenzte Haltezeit im Bereich von Minuten bis Stunden und eine eingeschränkte Speicherkapazität, die jedoch um einiges größer ist als die des Kurzzeitgedächtnisses. Das Protokollgedächtnis befähigt zur Betrachtung der eigenen Denkprozesse und ist eine wichtige Basis für die Entwicklung von Bewusstsein. Durch diese Selbstreflexion werden Denkstereotypen vermieden und die Fähigkeit zum Denken und Problemlösen gesteigert.

Eine genaue Erklärung des Aufbaus des mentalen Modells, also der Vorstellungen, die ein Produktentwickler/Konstrukteur während der Beschäftigung mit einer Aufgabe hat, kann die Psychologie nicht bieten. Allerdings kann sie Anhaltspunkte liefern, die Rückschlüsse auf die Struktur des mentalen Modells erlauben. Dazu bietet sich eine genauere Betrachtung der im Verlauf dieses Teilkapitels bereits erwähnten vier Problemlösestrategien nach Dörner an. Wesentliche Elemente dieser Strategien sind in Abbildung 2-7 dargestellt.

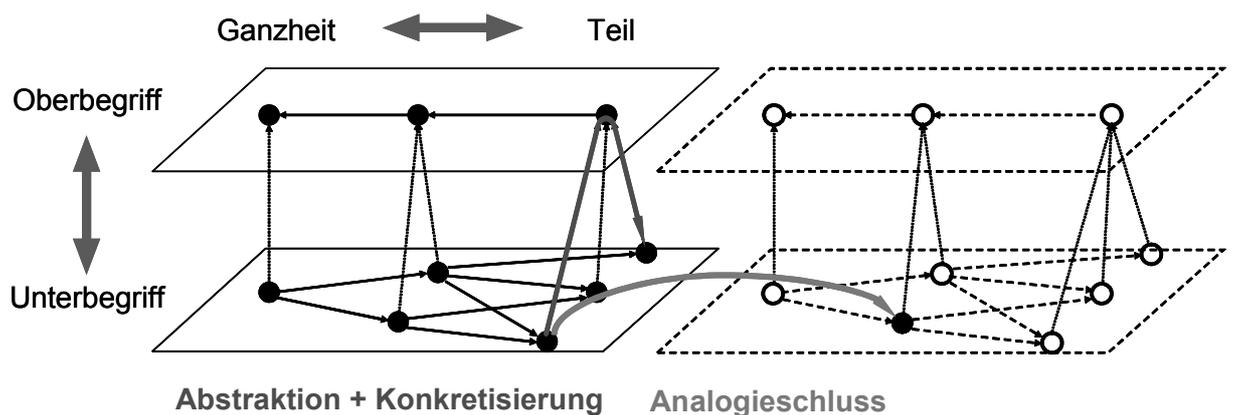


Abbildung 2-7: Strategien zur Änderung des Problemraums

Einen zentralen Mechanismus beim kreativen Denken stellt die Strategie des Abstrahierens und Rekonkretisierens dar. Durch gezielte Abstraktion wird beispielsweise der Begriff Schraube zum Oberbegriff Verbindungselement transformiert, der wiederum durch Konkretisierung zum Unterbegriff Niet oder zur Schweißnaht wird [DÖRNER 1999]. Werden die so entstehenden Elemente kombiniert, können gänzlich neue Lösungen erzeugt oder bestehende Lösungen zumindest variiert werden.

Die Strategie der Analyse zerlegt ein System in seine Subsysteme. Durch den Wechsel von der Ganzheit zu einem Teil wird die oft unüberschaubare Komplexität des Gesamtsystems umgangen. Für die verschiedenen Teilsysteme können isoliert Handlungsoptionen untersucht werden.

Mit der Suche nach Analogien kommt eine Strategie zum Einsatz, der eine „nicht überschätzbare Rolle“ im Bereich menschlicher Kreativität zugeschrieben wird [DÖRNER 1995]. Durch das probeweise Übertragen des zu bearbeitenden, aber wenig vertrauten Problemraums in einen bekannteren wird „fremdartiges“ Material übernommen, das für die Lösung des aktuellen Problems dienlich ist. Methoden wie Synektik oder Bionik wenden dieses Prinzip gezielt an um Analogieschlüsse zu generieren und damit gezielt die Kreativität der Anwender zu stimulieren.

Nicht in Abbildung 2-7 dargestellt ist die Strategie „Wechsel der Codierung“. Darunter versteht man die Überführung zwischen verschiedenen gedächtnisinternen Darstellungsformen. In diesem Zusammenhang von Interesse sind die propositionale und die analoge Darstellungsform. Die analoge Darstellung entspricht im Wesentlichen der Reizvorlage, also beispielsweise dem Bild, das auf der Netzhaut abgebildet wird. Dahingegen liegt die propositionale Darstellung in einer abstrakten Form, z. B. als Begriff vor und bedarf der Bildung einer Vorstellung, um verstanden zu werden. Analoge Darstellungen haben den Vorteil, leicht zugänglich zu sein und ermöglichen einen einfachen Perspektivwechsel. Allerdings widersetzen sie sich Transformationen, gerade bei komplexeren Gebilden. Durch die Überführung von analogen in propositionale Darstellungen kann so der Betrachtungshorizont erweitert werden.

Zusammenfassend betrachtet lassen sich aus den vier Strategien zwei wesentliche Freiheitsgrade des mentalen Modells extrahieren: auf der einen Seite variieren die Vorstellungen zwischen konkret und abstrakt, auf der anderen Seite gibt es neben den bildlich-geometrischen Vorstellungen auch solche, die aus Wörtern bzw. Symbolen bestehen (Abbildung 2-8). Damit geht das mentale Modell über das hinaus, was als „innere Leinwand“ bezeichnet wird. Kreative Prozesse werden unter anderem durch Wechsel der Darstellungsform stimuliert. Werkzeuge zur Externalisierung des mentalen Modells aufgrund der begrenzten Kapazität des Arbeitsgedächtnisses sollten diese Vielseitigkeit der Darstellungsformen berücksichtigen und neben der Verarbeitung konkreter Geometriedaten auch die Generierung abstrakter Modelle sowie die Verwendung von Wörtern und Symbolen anbieten. Die Frage, ob die geometrische Darstellungsform des mentalen Modells dreidimensionale Daten beinhaltet, lässt sich nicht eindeutig beantworten. Die Tatsache, dass der Mensch über eine räumliche Wahrnehmung verfügt, legt den Schluss nahe, dass das mentale Modell eines dreidimensionalen Objektes nicht rein zweidimensional ist, sondern auch Tiefeninformationen beinhaltet. Auf der anderen Seite neigt der Mensch aber auch zu Vereinfachungen wie z. B. Linearisierungen, die möglicherweise in manchen Fällen auf die mentale Repräsentation dreidimensionaler Objekte angewendet werden. Auf jeden Fall entspricht das mentale Modell nicht den üblichen Darstellungsformen auf zweidimensionalen Skizzen, da sonst keine Lernprozesse für das Erstellen korrekter perspektivischer Darstellungen oder für die Interpretation von 2D-Fertigungszeichnungen erforderlich wären.

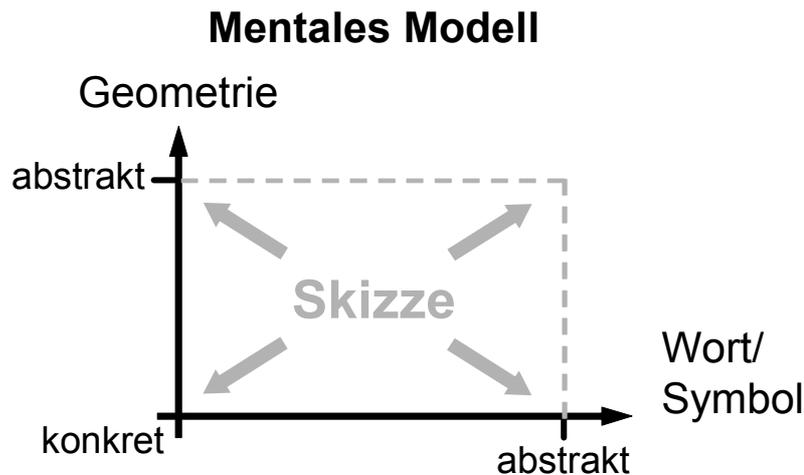


Abbildung 2-8: Geometrie und Wort/Symbol als wesentliche Freiheitsgrade des mentalen Modells

Ein weiterer Aspekt, der bei kreativen Prozessen eine wichtige Rolle spielt, ist der der Selbstreflexion. Gerade bei schwierigen Problemlösungsprozessen ist die Reflexion eigenen Handelns zielführend [REITHER 1979, DÖRNER ET AL. 1983]. Das Lösen von Problemen in Form von Dialogen, egal ob mit sich selbst oder mit anderen, scheint ein Charakteristikum von kreativen Problemlöseprozessen zu sein. Darauf basiert beispielsweise das von WULF [2002] vorgeschlagene methodische Konzept der diskursiven Lösungssuche. Die Ergebnisse des DFG-Projektes „Visuelle Vorstellungen im Konstruktionsprozess“ [TENZER 2004] zeigen einen Zusammenhang zwischen der Intensität von Selbstgesprächen und der Güte der erarbeiteten Lösungen. Der verbale Charakter der Selbstgespräche vor dem Hintergrund einer bildlich-geometrischen Problemstellung zeigt noch einmal die Wichtigkeit des Wechsels der Codierung bei kreativen Prozessen.

2.2.2 Werkzeuge und Medien zur Externalisierung des mentalen Modells

Die begrenzte Kapazität des Arbeitsgedächtnisses erschwert die Bearbeitung komplexer technischer Probleme durch reine Gedankenarbeit. Durch die Externalisierung von Informationen ist es möglich, eine Überbelastung der mentalen Ressourcen und eine negative Beeinflussung der kreativen Problemlöseprozesse zu vermeiden oder zumindest einzuschränken [HACKER ET AL. 1998]. Dazu bedient sich der Entwickler/Konstrukteur externer Darstellungsmedien, mit denen er zur Entlastung des Arbeitsgedächtnisses Informationen festhalten kann. Bei Bedarf können diese Informationen wieder aufgenommen und weiterverarbeitet werden [SACHSE ET AL. 1999]. Im Folgenden sollen die Werkzeuge und Medien, die zur Externalisierung von Gedächtnisinhalten verwendet werden, genauer betrachtet werden.

Die in frühen Phasen von Entwicklungsprozessen vorherrschenden Produktrepräsentationen zur Darstellung von Ideen stellen Skizzen und physische Modelle dar, teilweise wird auch mit CAD-Systemen gearbeitet. Skizzen sind linienbasierte Darstellungen auf zweidimensionalen Medien wie Papier und werden üblicherweise mit Stiften erzeugt. Physische Modelle stellen eine vereinfachte und oft maßstäblich veränderte dreidimensionale Repräsentation des zu entwickelnden Produkts oder einer Komponente davon dar. Im Gegensatz zu Skizzen ist hier die Bandbreite an verwendeten Medien und Werkzeugen deutlich größer. Prinzipiell sind alle Werkstoffe für physische Modelle geeignet, allerdings beschleunigt eine leichte Bearbeitbarkeit die Anfertigung. Aus diesem Grund werden für in frühen Phasen hergestellte Modelle Materialien wie Knetmasse, Pappe, Schaum und Holz verwendet, die mit den Händen oder mit einfachen Werkzeugen bearbeitet werden können [HARFENSTELLER 2002]. Physische Modelle können „einen Beobachter einen Schritt näher an die Wirklichkeit heranführen als eine Zeichnung“ [FERGUSON 1993], allerdings ist der Zeitaufwand für die Erstellung meist höher als für eine einfache Skizze.

Auch für die Erstellung virtueller Produktrepräsentationen wird der Begriff Modellieren verwendet. Aufgrund eingeschränkter Intuitivität bei der Bedienung herkömmlicher CAD-Programme kommen diese in frühen Phasen der Produktentwicklung kaum zum Einsatz [PACHE & RÖMER 1999]. Zukünftige rechnerbasierte Werkzeuge auf Basis von Virtual-Reality-Technologien mit haptischer Benutzerschnittstelle mögen vielleicht einmal die drei Darstellungsformen Skizze, physisches Modell und digitales Modell integrieren.

Im Folgenden wird der Einsatz von Skizzen in der Produktentwicklung genauer betrachtet. Bei Skizzen besteht im Gegensatz zu physischen Modellen ein größeres Potenzial, die Funktionalität in zukünftige Rechnerwerkzeuge zu integrieren.

In der industriellen Praxis werden Skizzen meistens nicht so geplant und strukturiert eingesetzt wie CAD-Software. Skizzen entstehen entweder als persönliche Notizen des Entwicklers/Konstrukteurs, als Ergebnis von Teamsitzungen zur Lösungssuche oder als Kommunikationshilfsmittel in Dialogen bzw. Besprechungen. In den meisten Fällen entstehen derartige Skizzen auf Papier und werden – wenn überhaupt – individuell archiviert. Eine Verwaltung im unternehmensweiten EDM/PDM-System und damit eine Integration in den digitalen Workflow ist wegen des Aufwandes der nachträglichen Digitalisierung durch Einscannen oder Abfotografieren unüblich. Dies erschwert wiederum den Einsatz von Rechnerwerkzeugen zur Dokumentation von Ideen, wie sie beispielsweise von SCHWANKL [2002] vorgeschlagen werden. Diese Problematik könnte durch die direkte Erstellung von Skizzen mit digitalen Eingabewerkzeugen wie LCD-Skizziertablets oder Tablet PCs⁵ umgangen werden. Allerdings sind derartige Geräte im industriellen Alltag kaum verbreitet und besitzen im Vergleich

⁵ Tablet PC ist ein von Microsoft® definierter Standard für stiftbediente Notebooks.

zu Stift und Papier eine eingeschränkte Mobilität. Darüber hinaus wird der spontane Einsatz derartiger Geräte durch Ladezeiten von Betriebssystem und Skizzierprogrammen sowie der Notwendigkeit einer Stromversorgung eingeschränkt. Die in diesem und im folgenden Kapitel beschriebenen Erkenntnisse zum Thema Skizzieren in der Produktentwicklung basieren auf Untersuchungen, bei denen papierbasierte Skizzen zum Einsatz kamen. Diese Erkenntnisse gelten jedoch größtenteils auch für mit Rechnerwerkzeugen angefertigte digitale 2D-Skizzen. Im Vergleich dazu haben übliche CAD-Systeme für kreative Prozesse erhebliche Defizite, da zum einen Ideen erst konkretisiert werden müssen um überhaupt dargestellt werden zu können und zum anderen die Bedienung wenig intuitiv ist.

Welchem Zweck dienen Skizzen eigentlich? Ganz allgemein dienen sie der Externalisierung des mentalen Modells. Etwas konkreter auf den Einsatz beim Entwerfen bezogen gibt es nach FERGUSON [1993] folgende Gründe für den Einsatz von Skizzen:

- Neue Ideen ausprobieren
- Alternativen vergleichen
- Flüchtige Gedanken auf Papier bannen

Ferguson unterscheidet drei Arten von Skizzen: die erste ist die „Denkskizze“, die Ingenieure verwenden um „sich etwas klar zu machen“ und die ein Ausdruck ihres nichtsprachlichen Denkens ist. Die nächste ist der „Vorentwurf“, der von einem Ingenieur angefertigt wird um einen Zeichner bei der Erstellung einer technischen Zeichnung anzuleiten. Die dritte Art der Skizze bezeichnet Ferguson als „sprechende Skizze“, die zum Gedankenaustausch zwischen Ingenieuren benutzt wird.

Vergleicht man Skizzen, die von Ingenieuren gemacht wurden, mit Skizzen von Industriedesignern, so lässt sich ein weiteres Unterscheidungskriterium für Skizzen finden: Steht beim Designer die äußere Form im Vordergrund, so ist für den Ingenieur die Funktion das ausschlaggebende Kriterium. Der Fokus dieser Arbeit richtet sich auf funktionsorientierte Skizzen.

2.2.3 Förderung der Kreativität und Kommunikation durch Skizzen

Eine Umfrage unter 106 Entwicklern verschiedenster Unternehmen aus den Bereichen Maschinenbau, Automobilbau und verwandten Branchen hat gezeigt, dass Handskizzen neben CAD immer noch eine entscheidende Rolle im Entwicklungsprozess spielen [RÖMER ET AL. 2001]. Mehr als die Hälfte der Befragten gaben an, dass sie Handskizzen zumindest häufig vor dem Einsatz von CAD nutzen. Auch während der Arbeit an CAD nutzen etwa 35% der Befragten häufig oder immer Handskizzen (siehe Abbildung 2-9). Über 90% gaben an, dass die Entwicklung von neuen Lösungskonzepten ein Hauptgrund für den Einsatz von Skizzen

ist. Dies legt die Vermutung nahe, dass Skizzen Eigenschaften besitzen, die kreative Prozesse besser unterstützen als CAD oder die Arbeit mit CAD zumindest sinnvoll in dieser Richtung ergänzen.

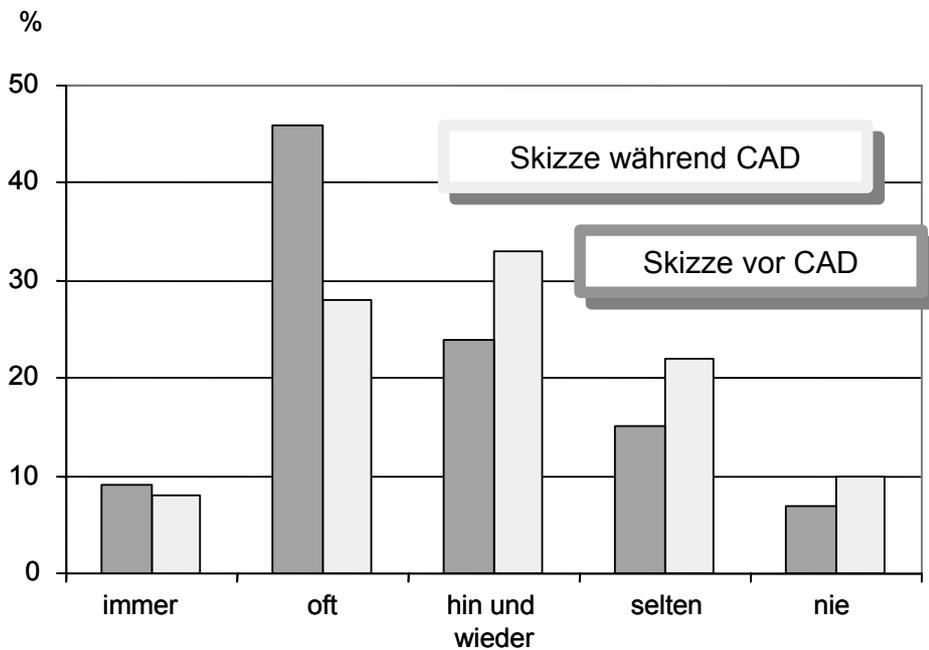


Abbildung 2-9: Ergebnis der Befragung von 106 Entwicklern zur Nutzung von Handskizzen vor und während der Arbeit mit CAD [RÖMER ET AL. 2001]

Betrachtet man Handskizzen, die beim Entwickeln von Lösungskonzepten genutzt werden, so zeigt sich, warum dieses Medium in besonderer Weise zur Darstellung von abstrakten mentalen Modellen geeignet ist. Die Bandbreite an Informationen, die in einer konzeptionellen Handskizze enthalten ist, kann weit über die eines entsprechenden CAD-Modells hinausgehen und wurde von PACHE ET AL. [2001A] genauer untersucht: So können in Skizzen geometrische Festlegungen mit unterschiedlichen Abstraktionsgraden enthalten sein. Vage Angaben zu Form und Lage eines Elements werden durch unsaubere, schwache (teilweise mehrfach gezeichnete) Linien dargestellt (siehe Abbildung 2-10). Diese abstrakte Festlegung steht stellvertretend für eine Bandbreite möglicher konkreter Konturen, die das Element letztendlich annehmen kann. Konkrete Festlegungen werden dagegen durch exakte, stark gezeichnete Linien markiert. Abstrakte und konkrete geometrische Festlegungen können gleichzeitig in einer Skizze vorhanden sein. Neben rein geometrischen Informationen können Skizzen auch funktionelle Festlegungen auf einem hohen Abstraktionsgrad enthalten. Kinematische Eigenschaften eines Systems werden häufig durch Bewegungskurven oder die Darstellung verschiedener Zustände des Systems innerhalb einer Skizze dargestellt. Symbolhafte Elemente einer Skizze sind als abstrakte Platzhalter für komplexere Informationsgehalte zu verstehen. So werden beispielsweise Punkte zur Darstellung von Gelenken und Pfeile zur Darstellung der Freiheits-

grade der Gelenke verwendet. Begriffe stellen in diesem Zusammenhang Festlegungen auf höchstmöglichem Abstraktionsgrad dar, so wird durch das Einfügen des Begriffs „Anschlag“ noch keine Entscheidung zur späteren geometrischen Ausprägung dieses Elementes getroffen. Die mögliche Lösungsvielfalt, die sich hinter diesem Begriff verbirgt, wird dadurch nicht eingeschränkt und doch wird das Element durch die Lage des Wortes innerhalb der Skizze geometrisch und funktionell zu den übrigen Skizzenelementen in Beziehung gesetzt. Skizzen lassen also nicht nur Festlegungen auf einem hohen Abstraktionsgrad zu, sie können zudem auch unscharf, unvollständig und sogar irrational sein. Bedingt durch die Abstraktion und die damit verbundene Unschärfe besitzen Skizzen eine Zwei- bzw. Mehrdeutigkeit und enthalten eine Vielzahl von Lösungsmöglichkeiten. Dies kann dazu führen, dass bereits bestehende Skizzenteile neu interpretiert werden [PACHE 2003, GOLDSCHMIDT 1999], da die Geometrie noch nicht genau festgelegt ist.

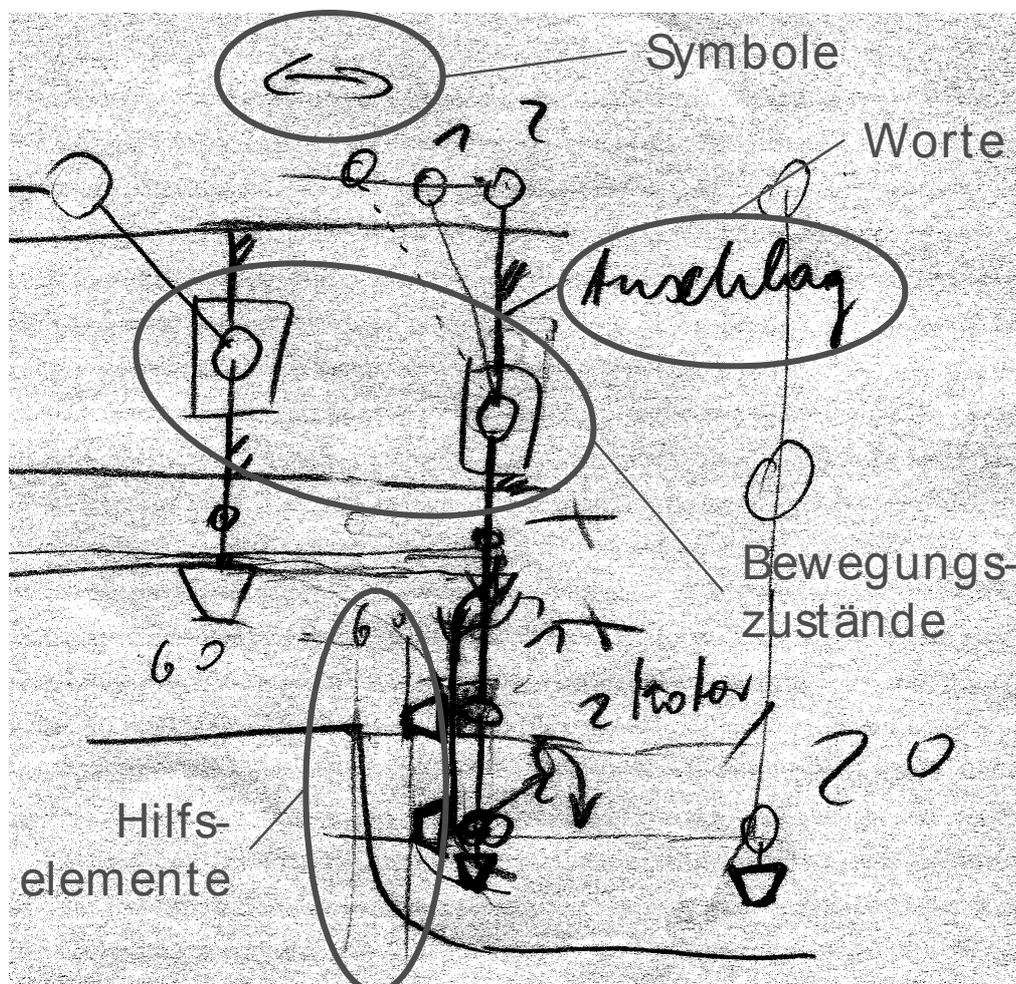


Abbildung 2-10: Beispiel einer Skizze zur Entwicklung eines Laserschweißroboters [Pache 2003]

Bemerkenswert ist neben der Art der Elemente, die skizziert werden auch die motorische Komponente des Skizzierens [PACHE ET AL. 2001B] (siehe Abbildung 2-11). Vielfach wurde ein „Probearbeiten“ beobachtet, bei dem die Zeichenbewegung mit dem Stift wenige Millimeter über dem Papier getestet und die Richtung der Bewegung dabei mehrfach variiert wird, bevor der Stift gesenkt und die Linie tatsächlich gezeichnet wird. So können innerhalb von Sekunden verschiedene Varianten getestet werden. Auch ist zu beobachten, dass Entwickler während des Zeichnens von Linien innehalten und wahrscheinlich schon während des Zeichnens das momentane Ergebnis ihrer Handlung (quasi „online“) auf Richtigkeit überprüfen. Pache nennt dies „Dialog mit der Skizze“. Selbst wenn keine Linie gezeichnet wird und die Skizze lediglich betrachtet wird, wird mit dem Stift auf Elemente gedeutet. Das Auge wird so über das Blatt geführt und möglicherweise die Vorstellung von neuen oder veränderten Elementen in der Skizze unterstützt. Sobald der Entwickler sich für eine Veränderung der Darstellung entscheidet, kann das Element sofort gezeichnet werden, da sich der Stift bereits an der betreffenden Stelle der Skizze befindet.

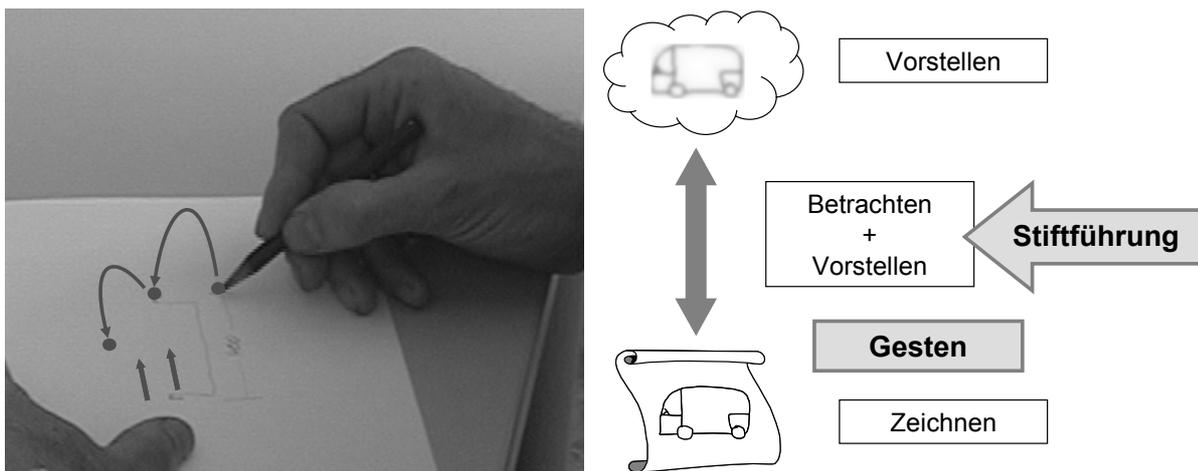


Abbildung 2-11: Ablauf des kreativen Prozesses beim Skizzieren

Skizzen dienen somit nicht nur als externer Informationsspeicher zum Festhalten des Endergebnisses eines kreativen Denkprozesses. Sie begleiten und unterstützen vielmehr den Prozess der Lösungsfindung und dienen ständig als Zwischenspeicher für den momentanen Entwicklungsstand.

Über den kreativitätsfördernden individuellen Dialog des Entwicklers/Konstruktors mit seiner eigenen Skizze hinaus unterstützen Skizzen die Kommunikation mit anderen – im Sinne der „sprechenden Skizze“ nach FERGUSON [1993]. Viele Skizzen werden während Gesprächen und Besprechungen angefertigt und dienen dabei als Kommunikationswerkzeug. Wenn Worte nicht mehr ausreichen, um die eigenen Gedanken den Gesprächspartnern zu vermitteln, wird die Skizze als bildliches Kommunikationsmedium gewählt. Besonders für die Kommu-

nikation unter Ingenieuren sind Skizzen essenziell. Auch eher ungeeignete Medien wie Servietten oder Taschentücher werden in Situationen, in denen das Bedürfnis besteht, Ideen jemandem mitzuteilen, verwendet.

Die Weiterverarbeitung und die damit verbundene Konkretisierung von Skizzen zu auskonstruierten CAD-Modellen ist mit einem Medienbruch verbunden. Der Übergang vom Medium Papier auf das Medium Rechner kann einerseits – findet er während kreativer Denkprozesse statt – durch die Belegung mentaler Ressourcen diese Prozesse behindern. Andererseits kann ein Medienbruch aber auch die Reflexion eigener Lösungen fördern, wenn nach einer Schaffenspause Skizzen zum Zweck der Weiterverarbeitung im Rechner nochmals betrachtet werden.

Abschließend betrachtet stellt sich das Skizzieren mit Stift und Papier zur Lösungsentwicklung als ein fließender Prozess dar, bei dem Festlegungen in kürzester Zeit getroffen, überprüft und variiert werden. Die einzelnen Prozessschritte können nahtlos ineinander übergehen, da die Bedienung des Mediums im Gegensatz zur bewussten Menüarbeit bei CAD-Systemen keine Unterbrechung des kreativen Denkprozesses erfordert. Die Informationen können in großer Übereinstimmung mit dem mentalen Modell fixiert werden, eine abstrakte und unscharfe Vorstellung muss nicht konkretisiert werden, nur damit sie darstellbar ist.

2.3 Rechnerwerkzeuge

Dieses Teilkapitel behandelt den aktuellen Stand der Rechnerwerkzeuge zur Geometriemodellierung. Nach einem Überblick über Computer Aided Design sowie Virtual- und Augmented-Reality-Technologien wird auf Bedienkonzepte und Datenmodelle von Rechnerwerkzeugen unter dem Aspekt des Einsatzes in frühen Entwicklungsphasen eingegangen. Anschließend werden die Ergebnisse von Forschungsarbeiten zu digitalem Skizzieren und Modellieren in frühen Phasen vorgestellt und auf die Integration digitaler Werkzeuge in den Produktentwicklungsprozess eingegangen.

2.3.1 CAD – Computer Aided Design

Für viele Entwickler und Konstrukteure stellen CAD-Systeme die zentrale Software für rechnergestützte Geometriemodellierung dar. In diesem Teilkapitel wird ein Überblick über die historische Entwicklung der CAD-Technologie sowie ihre heutige Anwendung gegeben.

Im Jahre 1963 stellte Sutherland das System SKETCHPAD vor, das es ermöglichte an einem computergesteuerten Radarschirm interaktiv mittels Lichtstift und Tastatur einfache Zeichnungen zu erstellen und zu verändern [SUTHERLAND 1963]. Dieses System gilt nicht nur als

der Urvater aller CAD-Systeme, sondern wird allgemein als der Grundstein für den graphisch-interaktiven Umgang mit Rechnern angesehen. Mit den ersten kommerziell vertriebenen Systemen war man in der Lage, 2D-Zeichnungen elektronisch zu erzeugen. Im Vergleich zur Arbeit mit Tusche und Papier am Zeichnbrett stellte dies einen Fortschritt dar, da sehr saubere Zeichnungen erstellt wurden und Änderungsvorgänge erheblich einfacher zu bewerkstelligen waren. Durch die leistungsfähiger werdende Hardware wurde es im weiteren Verlauf der Entwicklung möglich, auch dreidimensionale Geometrieinformationen verwalten zu können. Auf diese Weise konnten sehr einfach perspektivische Ansichten erzeugt werden.

Inzwischen gibt eine große Anzahl verschiedener CAD-Systeme auf dem Markt. Neben den Anwendungen für die Ingenieursdisziplinen wie Maschinenbau, Bauingenieurwesen und Architektur, bei denen die mechanische Konstruktion im Vordergrund steht (M-CAD) gibt es auch spezielle Systeme z. B. für den Entwurf elektrischer Schaltungen (E-CAD) oder das Industriedesign (CAID). Verschiedene kommerzielle Systeme kämpfen auf dem Markt um die Gunst der Anwender. Ein vorherrschendes System wie es beispielsweise Microsoft® Windows® bei PC-Betriebssystemen ist, gibt es nicht. Da die verschiedenen Systeme auf herstellerspezifischen, proprietären Datenformaten aufbauen, haben Import- und Exportschnittstellen eine hohe Bedeutung. Um einen universellen Datentransfer zwischen verschiedenen Systemen zu ermöglichen, wurden neutrale Datenformate wie z. B. STEP, IGES oder VDA-FS entwickelt und standardisiert [SPUR & KRAUSE 1997]. Diese Formate ermöglichen auch die Weiterverarbeitung der mit CAD-Systemen erzeugten Geometrieinformationen in Spezialanwendungen. Beispiele dafür sind Simulationsverfahren wie FEM (Finite Elemente Methode), CFD (Computational Fluid Dynamics – engl. für Numerische Strömungssimulation) und MKS (Mehrkörpersimulation), aber auch die Fertigungsplanung und Rapid Prototyping.

Eine wesentliche Funktionalität von CAD-Systemen stellt die Möglichkeit der Zeichnungsableitung dar. Trotz der Möglichkeiten der digitalen Weiterverarbeitung der konstruierten CAD-Modelle in der Fertigungsplanung und Arbeitsvorbereitung wird nach wie vor häufig auf ausgeplottete 2D-Zeichnungen als Mittel zur Kommunikation zwischen Konstruktion und Fertigung gesetzt.

Die Ein- und Ausgabegeräte für die Arbeit mit CAD-Systemen haben sich seit den Anfangstagen nicht wesentlich verändert. Wurden zeitweise spezielle Eingabetabletts eingesetzt, so verwenden heutige CAD-Systeme die Standard-Rechnereingabewerkzeuge Tastatur und Maus. Für die Navigation kommt häufig noch zusätzlich eine SpaceMouse® [HIRZINGER 2000] oder ein ähnliches Eingabegerät mit drei translatorischen und drei rotatorischen Freiheitsgraden zum Einsatz. Im Gegensatz zur 2D-Maus setzen derartige 3D-Eingabegeräte eine Geschwindigkeitssteuerung um, d. h. eine Weg- bzw. Winkeländerung bedeutet eine entsprechende Geschwindigkeitsänderung beim Verschieben bzw. Rotieren. Die Generierung dreidimensionaler Objekte basiert, bedingt durch die vorhandenen 2D-Eingabegeräte, größtenteils

auf der Extrusion vorher angefertigter zweidimensionaler Skizzen. Für die Ausgabe werden großflächige Bildschirme verwendet. Von dreidimensionalen Objekten wird eine perspektivische Ansicht berechnet und zweidimensional auf dem Monitor dargestellt. 3D bedeutet hier also nicht wirkliche Dreidimensionalität, sondern „3D-Darstellung durch 2D-Projektion“.

Manche CAD-Systeme wie CATIA V5 sind inzwischen in der Lage, 3D-Objekte in Stereo darzustellen. Dieser Modus dient jedoch lediglich der Visualisierung und kann nicht produktiv für eine intuitive Modellierung in 3D genutzt werden. Die jetzigen Modellierungsverfahren und 2D-Bedienkonzepte sind mit den dafür notwendigen 3D-Eingabegeräten inkompatibel. Bereits die Verwendung von stiftbedienten 2D-Displays (Tablet PC, Wacom Cintiq®⁶) anstelle der üblichen räumlich getrennten Ein- und Ausgabegeräte wird durch die Verwendung von Mehrstastmäusen ausgelegte Bedienkonzepte erschwert, die beispielsweise das gleichzeitige Drücken mehrerer Maustasten erfordern.

2.3.2 Virtual Reality und Augmented Reality

Eine im Vergleich zur perspektivischen 2D-Darstellung heutiger CAD-Systeme erheblich realistischer wirkende Darstellung und Vermittlung computermodellierter Geometrieinformationen ist mit Hilfe von Virtual- und Augmented-Reality-Technologien möglich.

Definition

Der englische Begriff „Virtual Reality“ (VR) steht für virtuelle Realität und wird auch im deutschen Sprachraum vorwiegend unübersetzt verwendet. Unter virtueller Realität versteht man eine computergenerierte Umgebung, die ein Betrachter mit seinen natürlichen Sinnen als die ihn umgebende Realität erlebt und mit der er interagieren kann. Von herkömmlichen Benutzerschnittstellen unterscheidet sich Virtual Reality durch die Ausprägung der Parameter Immersion, Interaktion und Imagination [BURDEA ET AL. 2003]. Unter Immersion wird der Grad des Eintauchens in die virtuelle Welt verstanden [PIMENTEL & TEIXEIRA 1994]. Um eine hohe Immersion zu erreichen, sollten möglichst viele Sinne angesprochen werden und die reale Welt weitgehend durch die virtuelle Welt ersetzt werden. Eng damit verknüpft ist die Interaktion, die intuitiv und in Echtzeit stattfinden muss, um dem Benutzer ein realistisches Gefühl zu vermitteln. Immersion und Interaktion sind die Voraussetzungen dafür, dass in der Imagination, also der Vorstellungskraft des Benutzers das Gefühl entsteht, sich in der virtuellen Welt zu befinden und ein Teil davon zu sein. Derartige Welten werden in Anlehnung an den Science-Fiction-Roman „Neuromancer“ [GIBSON 1984] auch „Cyberspace“ genannt.

⁶ Stifttablett der Firma Wacom mit integriertem Display

Statt die reale Welt komplett durch eine virtuelle zu ersetzen, ist es mit Hilfe von Augmented Reality (AR, engl. für erweiterte Realität) Technologien möglich, die Sinneseindrücke aus der realen Welt mit zusätzlichen Informationen anzureichern. Ein mögliches Szenario sind virtuelle Montageanleitungen, die in das Gesichtsfeld des Monteurs eingeblendet werden und ihm am realen Modell beispielsweise zeigen, welche Schrauben wo angebracht werden wollen. Einen Schritt weiter geht Mixed Reality (MR) [MILGRAM & KISHINO 1994]. Hier verschmelzen künstliche und reale Welt nahtlos. Interaktion ist nicht nur mit realen Objekten, sondern auch mit virtuellen möglich. Virtuelle Seifenblasen würden beispielsweise bei Berührung durch die eigene, reale Hand zerplatzen. Mit Hilfe von kraftrückkoppelnden Eingabegeräten können die virtuellen Objekte auch fühlbar gemacht werden. Der Begriff der Mixed Reality wird allerdings nicht einheitlich verwendet und ist auch als Synonym für Augmented Reality in Verwendung.

Geschichte

Die historische Entwicklung der Virtual-Reality-Technologien begann in den 1960er Jahren [RHEINGOLD 1993]. Der Filmemacher Morton Heilig stellte 1960 sein „Sensorama“ vor, ein spezielles Vorführgerät, das Zuschauern neben Stereo-Bild und -Ton auch Bewegung, Wind und Duft vermittelte. Von den Sinneserfahrungen war dieses System mit heutigen VR-Installationen vergleichbar, allerdings fehlte die Interaktivität. Ivan Sutherland beschrieb 1965 in seinem Aufsatz „The Ultimate Display“ [SUTHERLAND 1965] die Vision mittels eines geeigneten Displays computergenerierte Welten zu erforschen. Wenig später stellte er das erste „Head Mounted Display“ (HMD, engl. für „am Kopf befestigtes Anzeigegerät“) vor, ein Gerät zur Anzeige computergenerierter stereoskopischer Bilder vor. In Folge wurde das System um Sensoren zur Positionserfassung von Kopf und Hand sowie Datenhandschuhe erweitert, um mit der virtuellen Welt interagieren zu können. Statt den Benutzer mit aufwendig verkabelten Sensoren einzuschränken, benutzte Krueger in seinem 1969 vorgestellten System „Videodesk“ ein Videobild des Benutzers selbst um dessen Gestik für die Interaktion mit der virtuellen Welt nutzen zu können. Zunächst wurden die Virtual-Reality-Technologien vorwiegend im militärischen Bereich und in der Forschung eingesetzt, erst in den 1990er Jahren ermöglichten sinkende Preise auch den Einsatz in Industrie, Medizin und Architektur.

Technologie

Der auffälligste Unterschied zwischen Virtual-Reality-Installationen und normalen Rechnerarbeitsplätzen ist die stereoskopische Darstellung der computergenerierten Objekte. Dadurch wird im Gegensatz zur perspektivischen Darstellung auf einem 2D-Monitor ein wirklicher räumlicher Eindruck vermittelt. Virtuelle Objekte scheinen im Raum zu schweben und können – bei Einbeziehung der Kopfposition des Benutzers in die Berechnung – intuitiv aus ver-

schiedenen Blickwinkeln betrachtet werden. Die verwendeten Ausgabegeräte unterscheiden sich in Stereo-Technologie, Größe und Immersionsgrad.

Für die Stereo-Darstellung ist es notwendig, jedem Auge getrennte Bilder zuzuführen. Eine Möglichkeit ist, für jedes Auge ein eigenes Display vorzusehen. Dieser Ansatz wird beispielsweise bei Head Mounted Displays verwendet. Alternativen dazu sind der Einsatz von Polfilter-Brillen (passives Stereo) oder Shutter-Brillen (aktives Stereo) um jedem Auge ausschließlich die dafür bestimmten Bildinformationen zukommen zu lassen. Eine weitere Möglichkeit stellen autostereoskopische Displays dar, die durch Optiken am Bildschirm die Bilder für linkes und rechtes Auge trennen und somit das Tragen eines Geräts oder einer Brille überflüssig machen.

Der Immersionsgrad ist von der Display-Größe und vom Betrachtungsabstand abhängig. Head Mounted Displays verfügen über eine kleine Bildfläche – durch die Anbringung direkt von den Augen wird jedoch ein maximaler Immersionsgrad erreicht. Um diesen mit anderen Stereo-Technologien zu erreichen, werden spezielle Räume, CAVE⁷ genannt, eingesetzt, deren Wände aus Projektionsflächen bestehen. Da derartige Installationen sehr teuer sind, kann auch nur eine Wand als Projektionsfläche realisiert werden (oft als „Powerwall“ bezeichnet). Ähnlich funktionieren auch Projektionstische oder Kombinationen aus Wand und Tisch (oft als „Holobench“ bezeichnet). Ein sehr kostengünstiger Ansatz ist die Verwendung eines Röhrenmonitors in Verbindung mit einer Shutter-Brille. Diese Lösung wird als „Desktop-VR“ oder „Personal Immersion“ bezeichnet. Flachbildschirme mit TFT-Technologie⁸ können dafür nicht eingesetzt werden, da sie nicht mit den dafür notwendigen Bildwiederholfrequenzen von mindestens 120 Hz betrieben werden können.

Bedingt durch den dargestellten dreidimensionalen Raum müssen dem Benutzer eines VR-Systems auch Eingabegeräte mit dreidimensionaler „Auflösung“ zur Verfügung stehen [BORMANN 1994]. Für die Interaktion mit den räumlich dargestellten virtuellen Objekten werden daher spezielle 3D-Eingabegeräte eingesetzt, die Bewegungen des Benutzers erfassen und an die Virtual-Reality-Software weiterleiten. Position und Orientierung der Hand bzw. eines darin gehaltenen Werkzeugs kann über mechanische, optische oder elektromagnetische Messverfahren ermittelt werden. Dieser Vorgang wird auch mit dem englischen Begriff „Tracking“ beschrieben. Oft wird auch die Kopfposition des Benutzers ermittelt, um in Abhängigkeit davon das Bild berechnen zu können. Dies ermöglicht eine verbesserte Imagination, da das natürliche Verhalten, einen virtuellen Gegenstand durch Bewegen des Kopfes aus verschiedenen Blickwinkeln zu betrachten, unterstützt wird. Mit Hilfe von Datenhandschuhen können die Winkel der einzelnen Fingergelenke ermittelt und somit eine gestenbasierte Steuerung

⁷ Rekursives Akronym für Cave Automatic Virtual Environment

⁸ TFT: Abkürzung für Thin Film Transistor – engl. für Dünnschichttransistor

realisiert werden. Eine besondere Stellung haben kraftreflektierende Geräte. Die eingebauten Sensoren machen sie zu Eingabegeräten; die eingebauten Aktoren ermöglichen die Ausgabe von realen Kräften beim Umgang mit virtuellen Gegenständen.

Die für Virtual- und Augmented-Reality-Systeme benötigte Rechnerhardware sowie die darauf laufende Anwendungssoftware müssen echtzeitfähig sein um eine realistische Interaktion des Benutzers mit seiner virtuellen Umwelt zu ermöglichen. Wird beispielsweise ein virtuelles Objekt mit einem Datenhandschuh bewegt, darf kein zeitlicher Versatz zwischen der Bewegung der Hand und der Darstellung des Objektes auftreten. Zur Erfüllung der Echtzeitanforderungen werden Rechner mit leistungsfähiger Grafikhardware benötigt. Bis in die 1990er Jahre konnten nur spezielle Grafik-Workstations, die ein hohes Investitionsvolumen erforderten, diese Aufgaben erfüllen. Inzwischen lassen sich auch günstige Standard-PCs für Virtual-Reality-Anwendungen einsetzen. Im Unterschied zu CAD-Software müssen Virtual- und Augmented-Reality-Anwendungen dreidimensionale Geometriedaten nicht nur verwalten, sondern stereoskopisch ggf. auf mehreren Projektionsflächen darstellen können. Dies bedeutet die parallele Berechnung des Bildes für beide Augen. Auch müssen 3D-Eingabegeräte wie Trackingsysteme und Datenhandschuhe unterstützt werden. Wird die Kopfposition des Benutzers erfasst, muss das Bild der gesamten Szene in Echtzeit an den sich ändernden Blickwinkel angepasst werden. Derartige Spezialsoftware ist meist mit hohen Investitionen verbunden und wird ergänzend zu bestehenden CAD-Systemen eingesetzt. Mit CAD erstellte 3D-Objekte können in Virtual- und Augmented-Reality-Programmen eingelesen und das programmspezifische Datenformat konvertiert werden. Ein Rücktransfer von geänderten Daten ins CAD wird dadurch allerdings erheblich erschwert.

Virtual Reality im Produktentstehungsprozess

Bedingt durch die technologischen Einschränkungen beim Datentransfer zwischen CAD- und VR-Programmen konnten letztere erst in späteren Phasen des Produktentstehungsprozesses eingesetzt werden. Nach Abschluss der CAD-Konstruktion können die erzeugten Daten mit einem VR-System visualisiert werden. Auf diese Weise können Design-Reviews durchgeführt werden, ohne zeit- und kostenintensive physische Prototypen bauen zu müssen. Neben der reinen Betrachtung der virtuellen Objekte in der VR-Umgebung ist es auch möglich, einzelne Objekte in ihrer Lage und Position zu verändern. So können Kollisionsuntersuchungen und Montagesimulationen durchgeführt werden. Aus den dabei gewonnenen Erkenntnissen resultierende Änderungen müssen manuell in die CAD-Anwendung übertragen werden. Auch in den Bereichen Fertigungsplanung, Montageplanung sowie Fabriklayoutplanung wird Virtual Reality erfolgreich eingesetzt um ohne Modelle oder Prototypen die Produktion zukünftiger Produkte planen zu können. Vom Einsatz von Virtual-Reality-Technologien im Produktentstehungsprozess erhofft man sich eine höhere Planungssicherheit, eine frühere Erkennung von

Fehlern und reduzierte Kosten durch die Verwendung rein virtueller Prototypen [KUNZ & MEIER 2001].

Einen durchgängig digitalen Produktentstehungsprozess unter Einbeziehung von Virtual-Reality-Technologien strebte das BMBF-geförderte Leitprojekt iViP (Integrierte Virtuelle Produktentstehung) an [KRAUSE ET AL. 2000]. Die in diesem Projekt entwickelten Softwarewerkzeuge erleichtern den Datenaustausch zwischen verschiedenen Softwarekomponenten, ermöglichen eine verteilte Kommunikation und bieten eine Anbindung an PDM-Systeme. Ein ähnliches Projekt stellte ARVIKA [FRIEDRICH 2000] dar, das mögliche Anwendungen von Augmented-Reality-Technologien in Entwicklung, Produktion und Service untersuchte. Geforscht wird auch an einer Integration von CAD- und VR-Systemen um einen bidirektionalen Datenaustausch oder um ein integriertes multifunktionales System zu realisieren [z. B. VAHL & VON LUKAS 2003]. Derartige Systeme wurden bisher jedoch noch nicht kommerziell realisiert.

Kritische Diskussion

Virtual-Reality-Technologien befinden sich in einem Spannungsfeld zwischen wissenschaftlichen Problemen, Erwartungen der Massenmedien und Visionen aus Science-Fiction-Filmen. Regelmäßig wird Virtual Reality eine große Zukunft vorausgesagt. Der Wissenschaftsjournalist Howard Rheingold sagte in seinem 1991 erschienenen Werk „Virtual Reality“ eine Revolution durch VR-gestützte Konstruktion binnen 10 Jahren voraus [RHEINGOLD 1992]. Auch Spur und Krause betrachten Virtual Reality als „Mensch-Maschine-Schnittstelle der Zukunft“ [SPUR & KRAUSE 1997]. Betrachtet man rückblickend diese Erwartungen, muss man feststellen, dass diese nicht in der erwarteten Geschwindigkeit eingetreten sind. Auf die hohen Erwartungen folgte anschließend eine Phase der Ernüchterung. Das Marktforschungs- und Beratungsunternehmen Gartner hat für derartige Entwicklungen neuer Technologien einen typischen zeitlichen Verlauf identifiziert [LINDEN & FENN 2003] und spricht von einer „Hype-Kurve“ (siehe Abbildung 2-12).

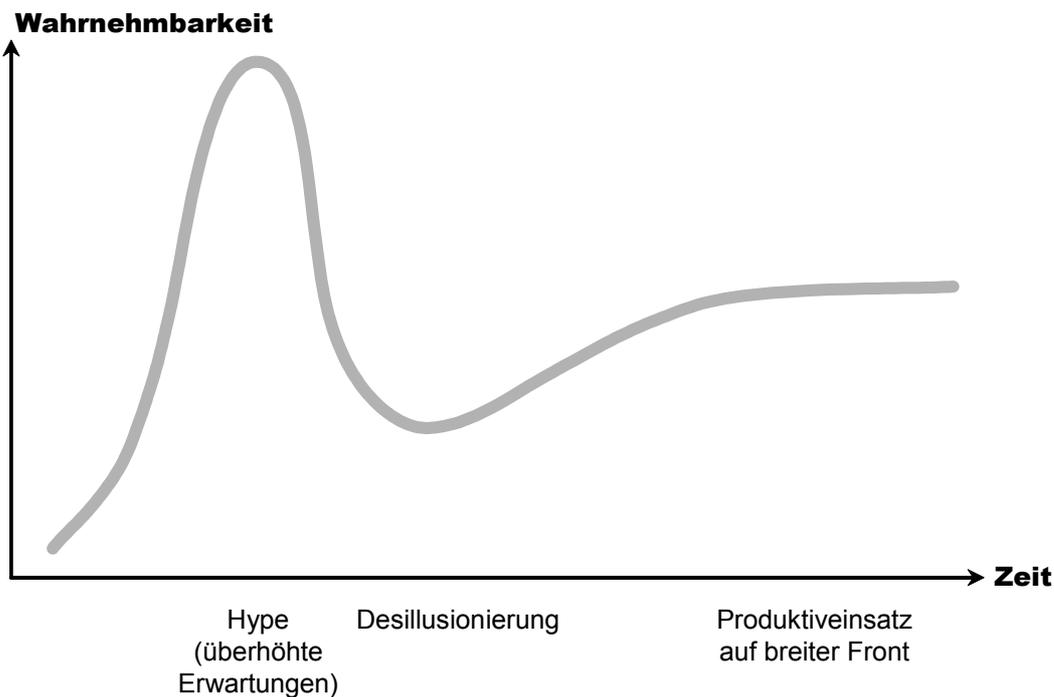


Abbildung 2-12: Hype-Kurve nach Gartner [aus DIEDRICH & SIERING 2003]

Offensichtlich ist es noch nicht gelungen, Technologien wie Stereo-Visualisierung und Head-Tracking wirklich alltagstauglich zu gestalten. Die ergonomische Qualität heute verfügbarer Virtual-Reality-Installationen ist lediglich ausreichend für das Arbeiten über kurze Zeiträume hinweg. Viele Benutzer klagen über Kopfschmerzen und Schwindelgefühle. Auch wird das Tragen spezieller Brillen und das umständliche An- und Ausziehen von Datenhandschuhen als unangenehm und unflexibel empfunden. Schwere Head-Mounted-Displays werden aus diesem Grund nur noch selten eingesetzt. Im Computerspiele-Bereich eingeführte VR-Technologien wie Stereo-Darstellung und Datenhandschuh konnten sich aus denselben Gründen nicht richtig durchsetzen und sind inzwischen bedeutungslos.

Bis jetzt hat sich Virtual Reality noch nicht in der Breite durchgesetzt. Neben den ergonomischen Mängeln sind zum einen die Kosten für Hard- und Software nach wie vor vergleichsweise hoch, zum anderen fehlen außerhalb von Forschung, Militär, Medizin und Industrie die für jedermann begehrten „Killerapplikationen“⁹, die für Virtual Reality einen Massenmarkt erschließen könnten. Aber auch eine integrierte CAD-VR-Lösung könnte als Technologietreiber dienen und Impulse für die Verbesserung hinsichtlich Qualität und Kosten geben.

⁹ Eine „Killerapplikation“ ist eine konkrete Anwendung, die einer neuen Technologie zum Durchbruch verhilft. Der Begriff leitet sich daher ab, dass konkurrierende, ähnliche und oft ältere Technologien schnell verdrängt werden. (Quelle: Wikipedia – Die freie Enzyklopädie)

2.3.3 Bedienkonzepte und Usability

Ein weiterer möglicher Grund für die geringe Verbreitung von Virtual-Reality-Anwendungen im praktischen Einsatz sind Schwächen in deren Bedienkonzepten. Die daraus resultierende mangelhafte Bedienbarkeit (Usability) erschwert das Arbeiten in der virtuellen Welt und senkt die Investitionsbereitschaft für derartige Systeme. Im Folgenden werden die Begriffe Bedienkonzept und Usability erläutert und der diesbezügliche Stand der Technik aufgezeigt.

Begriffsdefinitionen

Neben Immersion und Imagination ist die Interaktion nach Burdea ein wesentlicher Bestandteil von Virtual Reality [BURDEA ET AL. 2003]. Durch ein Bedienkonzept wird festgelegt, wie die Interaktionsmöglichkeiten mit der virtuellen Welt konkret umgesetzt werden. Bei der Erarbeitung eines Bedienkonzepts sind verschiedene Einflussgrößen zu berücksichtigen. Bedienkonzepte, die für großvolumige begehbare Darstellungsräume wie z. B. CAVEs geeignet sind lassen sich nicht unbedingt auf PDA¹⁰-basierte mobile Augmented-Reality-Anwendungen übertragen, da erhebliche Unterschiede in Dimensionalität und Größe von Handlungs- und Wahrnehmungsraum bestehen. Aber nicht nur die Größenunterschiede sind entscheidend, auch die Lage und Orientierung von Handlungs- und Wahrnehmungsraum zueinander sowie in Bezug auf den Benutzer beeinflussen das Bedienkonzept.

Ein weiterer relevanter Aspekt ist die technische Erfassung der Aktionen des Benutzers. Die Bandbreite an geeigneten Geräten ist groß und führt damit zwangsläufig zu unterschiedlichen Bedienkonzepten. Grundsätzlich kann man zwischen gestenbasierter und werkzeuggesteuerter Interaktion unterscheiden. Für die gestenbasierte Interaktion wird ein geeignetes Erfassungsgerät wie z. B. ein Datenhandschuh benötigt, die konkrete Auswahl hat allerdings kaum Einfluss auf das Bedienkonzept. Anders sieht es bei den Werkzeugen aus. Deren Gestaltung hinsichtlich Form, Anzahl und Anordnung von Bedienelementen beeinflusst das Bedienkonzept entscheidend. Ist nur ein Bedienelement vorhanden, müssen alle möglichen Aktionen darüber gesteuert werden, was zu unübersichtlichen Menüstrukturen führen kann. Viele Bedienelemente ermöglichen es, diese mit häufig benutzten Funktionen zu belegen. Allerdings fördert eine Vielzahl von Knöpfen auch nicht gerade die intuitive Bedienbarkeit. Eine sinnvolle Ergänzung kann hier die Benutzung eines Spracheingabesystems darstellen. Ein weiterer wesentlicher Einflussfaktor für die Gestaltung des Bedienkonzeptes stellt die Anzahl der in das Konzept integrierten Hände dar. Statt sämtliche Aktionen mit der dominanten Hand durchzuführen ist es auch möglich, zusätzlich die nichtdominante Hand zu erfassen und für spezielle Aktionen einzusetzen.

¹⁰ PDA – Abk. für Personal Digital Assistant (englisch für persönlicher digitaler Assistent): kleiner tragbarer Computer

Einen direkten Einfluss auf das Bedienkonzept haben zwangsläufig die Art und Anzahl der vom Benutzer auszulösenden Funktionen. Im Bedienkonzept wird für jede Funktion festgelegt, welche Schritte durchzuführen sind um diese auszulösen. Vor allem die Anzahl, aber auch die Art und die Auffindbarkeit der durchzuführenden Aktionen sind ausschlaggebend für die Intuitivität eines Bedienkonzeptes. Der Einsatz von Interaktionsmetaphern steigert die Intuitivität durch die Anlehnung an entsprechende Verhaltensweisen in der realen Welt. Ein virtuelles Objekt einfach zu greifen um es im Raum zu bewegen ist intuitiver als es erst mit einem Werkzeug zu selektieren und dann einen Rotations- oder Translationsbefehl auszuführen.

Die verschiedenen Aspekte, die für ein Bedienkonzept ausschlaggebend sind, sind ihrerseits stark miteinander vernetzt. Die oben beschriebene Greifmetapher beispielsweise bedingt nicht nur den Einsatz einer Gestenerkennung, zusätzlich müssen Handlungs- und Wahrnehmungsraum ausreichend groß und aufeinander abgestimmt sein um die gewünschte Intuitivität und Nähe zur Realität zu erreichen.

Unter Usability versteht man die Gebrauchstauglichkeit eines Bedienkonzeptes. Ausschlaggebende Faktoren für die Gebrauchstauglichkeit sind Effektivität, Effizienz und Zufriedenheit. In vergleichenden Untersuchungen können diese Faktoren durch Beobachtung und Befragung ermittelt werden und so eine Aussage zur Gebrauchstauglichkeit gemacht werden. Die Norm [DIN EN ISO 9241] definiert Kriterien für das Design ergonomischer Benutzerschnittstellen. In Teil 10 dieser Norm werden Grundsätze der Dialoggestaltung beschrieben, deren Berücksichtigung die Gebrauchstauglichkeit nicht nur von Dialogen, sondern von Bedienkonzepten im Allgemeinen erhöht. Im Einzelnen sind dies die folgenden Grundsätze:

- Aufgabenangemessenheit
- Selbstbeschreibungsfähigkeit
- Steuerbarkeit
- Erwartungskonformität
- Fehlertoleranz
- Individualisierbarkeit
- Lernförderlichkeit

All diese Grundsätze gelten auch für die Gestaltung von Bedienkonzepten für Virtual- und Augmented-Reality-Applikationen. Die Erfüllung des Grundsatzes der Erwartungskonformität wird dadurch erschwert, dass vertraute Funktionalität aus 2D-Bedienkonzepten nicht notwendigerweise in ein 3D-Bedienkonzept übertragen werden kann. Allerdings hat sich in 3D auch noch kein Standardkonzept etabliert.

2D-Bedienkonzepte

Gängige Geometriemodellierungssoftware ist auf die 2D-Ein- und -Ausgabegeräte von Standard-PCs ausgelegt. Deren grafische Benutzeroberflächen mit Fenstern, Icons, Menüs und Mausbedienung prägen die Bedienkonzepte von Software zur Geometriemodellierung wie z. B. CAD-Systemen. Die umfangreiche Funktionalität derartiger Programme geht einher mit einer unübersichtlichen Vielfalt an Icons und verschachtelten Menüeinträgen. Dies führt zu einer geringen Intuitivität, hohem Einarbeitungsaufwand und einer Vielzahl von durchzuführenden Mausklicks bereits bei einfachen Operationen. Bedingt durch die historischen Wurzeln der Programme und die verfügbaren Eingabewerkzeuge erfolgt die Bearbeitung der virtuellen Geometrie weitgehend in 2D. Die perspektivische 3D-Ansicht auf dem 2D-Bildschirm dient hauptsächlich der Betrachtung des erarbeiteten Ergebnisses aus verschiedenen Perspektiven. Die Navigation in dieser perspektivischen Darstellung wird dadurch erschwert, dass den sechs Freiheitsgraden eines 3D-Objektes nur zwei Freiheitsgrade beim Eingabegerät gegenüberstehen. Dies führt dazu, dass es verschiedene Modi für Translation und Rotation gibt und dennoch nur zwei der drei Raumachsen manipuliert werden können. Mit Hilfe eines 3D-Eingabegeräts wie der SpaceMouse® kann diese Problematik umgangen werden. Die Bedienkonzepte der gängigen 3D-CAD-Systeme unterstützen derartige Eingabegeräte und erweitern damit ihr 2D-Bedienkonzept zumindest in diesem Aspekt in Richtung 3D.

Alternativen bzw. Ergänzungen zu mausgesteuerten Bedienkonzepten mit Icons und Menüs stellen Gesten- und Spracherkennung dar. Zu Zeiten der 2D-CAD-Systeme waren Eingabetabletts mit Fadenkreuzcursor weit verbreitet und ermöglichten auch eine Gestensteuerung. Obwohl dies auch bei Maussteuerung möglich wäre, hat sich dieser Ansatz in der Praxis nicht durchgesetzt. Auch von der Möglichkeit der Sprachsteuerung machen die Bedienkonzepte gängiger CAD-Programme keinen Gebrauch.

3D-Bedienkonzepte für Virtual und Augmented Reality

Erfahrene CAD-Konstrukteure zeigen, dass der Mensch nach ausreichendem Training auch mit unzulänglichen Bedienkonzepten arbeiten kann. Dennoch zeigt der hohe Einarbeitungsaufwand für Neueinsteiger das vorhandene Verbesserungspotenzial auf. Virtual- und Augmented-Reality-Technologien bieten das Potenzial, den Umgang mit computergenerierten 3D-Objekten intuitiver zu gestalten. Durch die räumliche Darstellung und die Verwendung von 3D-Eingabegeräten ist es möglich, Verhaltensweisen aus der realen Welt in die virtuelle zu übertragen. So können beispielsweise virtuelle 3D-Objekte durch einfaches Greifen im Raum in sechs Freiheitsgraden bewegt werden oder virtuelle Tonblöcke mit realen oder virtuellen Werkzeugen bearbeitet werden.

Neben der Erzeugung und Manipulation dreidimensionaler Geometriedaten muss ein 3D-Bedienkonzept drei weitere Grundfunktionen verfügbar machen: Auswahl, Navigation und Konfiguration. Die Konzepte zur Realisierung dieser Funktionalität in heutigen VR- und AR-Applikationen sind sehr unterschiedlich. Auf der einen Seite gibt es Konzepte, die mit einem universellen Eingabegerät arbeiten und über Umschalter zwischen den verschiedenen Funktionen wechseln. Auf der anderen Seite wird der Ansatz verfolgt, mit verschiedenen funktions-spezifischen Eingabegeräten, einschließlich Spracheingabe, zu arbeiten. Auch bei den grafischen Benutzeroberflächen von aktuellen VR- und AR-Programmen gibt es unterschiedliche Ausprägungen. Die Bandbreite reicht von bekannten 2D-Grafikelementen bis zu räumlichen Icons und dreidimensionalen Menüstrukturen. Ein einheitlicher Standard hat sich bisher weder für die Art der Eingabegeräte noch für die Gestaltung der grafischen Bedienoberfläche etabliert. SCHÖNFELDER [2004] nennt dies als einen Grund für die mangelhafte Akzeptanz von Virtual und Augmented Reality und führt die Heterogenität darauf zurück, dass VR-Forschung bisher stärker technologiegetrieben als bedürfnisgetrieben war.

Bedienkonzepte, die den Einsatz von aus der Realität vertrauten Bewegungsmustern und Werkzeugen vorsehen, haben Vorteile in Sachen Gebrauchstauglichkeit. So nutzen stiftbasierte Bedienkonzepte – auch als „Calligraphic Interfaces“ [PEREIRA ET AL. 2000] bezeichnet – die Tatsache, dass der Umgang mit Stiften bereits früh im Leben erlernt wird und dadurch die Motorik für die exakte Positionierung der Stiftspitze bereits trainiert ist. Die Entwicklung von stiftbasierten Bedienkonzepten ist oft eng mit der Entwicklung entsprechender Eingabegeräte verbunden, wie das Beispiel des Cyberstilo [GRAF ET AL. 2004] zeigt.

Der Einsatz von kraftreflektierenden Werkzeugen kann das Vertrautheitsgefühl weiter steigern, beispielsweise in der virtuellen Tonmodellierung [KRAUSE & BIAHMOU-TCHEBECHOU 2002]. Das Bedienkonzept muss dann um eine haptische Komponente erweitert werden, die festlegt, wann welche Kräfte wo erzeugt werden.

Ein weiteres natürliches Verhalten, das von 3D-Bedienkonzepten aufgegriffen wird, ist die Benutzung beider Hände. Wie in der Realität auch kann somit die dominante Hand ein Werkzeug führen während die nichtdominante Hand das bearbeitete Objekt positioniert und festhält. GRIBNAU [1999] beschreibt detailliert die Vorzüge eines zweihändigen Bedienkonzeptes. Eine verbreitete Basissoftware für Augmented-Reality-Anwendungen ist das System „Studierstube“ der Technischen Universität Wien [SCHMALSTIEG ET AL. 1998], das die Schreib-tisch-Metapher in den Raum erweitert. Dieses System unterstützt zweihändige Bedienkonzepte. Eine beispielhafte Implementierung eines derartigen Bedienkonzeptes stellt das „Personal Interaction Panel“ [SZALAVÁRI 1999] dar.

Einen weitergehenden Ansatz verfolgen multimodale Interaktionskonzepte, deren Ziel es ist, möglichst weitgehend natürliche Verhaltensweisen bei der Kommunikation zu unterstützen. Als Eingabekanäle werden neben Gestik, Schrift und Sprache auch Mimik und Blickrichtung

verwendet, ggf. ergänzt durch herkömmliche Eingabegeräte wie Tastatur und Maus. Die heute verfügbaren Technologien zur Erfassung von Gestik, Mimik und Blickrichtung erlauben bislang nur die prototypische Umsetzung entsprechender Konzepte. Eine derartige Anwendung stellt das einfache 3D-Konstruktionsprogramm „CAD-Raum“ dar, das auf der multimodalen Bedienschnittstelle mUltimo3D basiert und kombiniert über Maus, Sprache und Blicke gesteuert wird [SEIFERT 2002].

In Virtual-Reality-Umgebungen kann die Stereodarstellung von virtuellen 3D-Objekten für manche Tätigkeiten wie ebenes Skizzieren auch als störend empfunden werden. Durch eine geeignete Integration der Umschaltung zwischen monoskopischer und stereoskopischer Darstellung in das Bedienkonzept kann die Benutzung erleichtert werden, beispielsweise durch eine kontext- und werkzeugabhängige Steuerung des Darstellungsmodus [FORSBERG ET AL. 1998].

2.3.4 Datenmodelle und Unschärfe

Die Abbildung der Realität im Rechner geschieht mit Hilfe von Modellen. Der Einsatz von Rechnertechnologie in der Produktentwicklung erfordert daher ein geeignetes Produktmodell. Einfache Produktmodelle bilden lediglich die Geometrieinformationen ab, wohingegen komplexere Produktmodelle zusätzliche Informationen verwalten, beispielsweise zu stofflichen und physikalischen Eigenschaften, Kosten, Funktionen oder Anforderungen. Wesentlicher Einsatzzweck aktueller Systeme für CAD, Industriedesign, Virtual Reality und Augmented Reality ist die Modellierung und Visualisierung von Geometriedaten.

Die entsprechenden Geometriedatenmodelle basieren auf der Verwaltung exakter Geometriewerte. Damit ist bei der Geometriemodellierung immer die Eingabe exakter Maße erforderlich. Diese Forderung steht der Arbeitsweise und den Erfordernissen früher Konzept- und Entwicklungsphasen entgegen, in denen eher vage Vorstellungen über die Produktgeometrie existieren. Auch die menügeführte Dateneingabe ist in den frühen Phasen hinderlich. Aus diesen Gründen wird in diesem Teilkapitel nicht nur der Aufbau exakter Geometriedatenmodelle beschrieben, sondern auch auf Verfahren zum Umgang mit unscharfen Daten in Rechnersystemen eingegangen und hinsichtlich ihres Potenzials zur Modellierung unscharfer Geometrieinformationen bewertet.

Geometriedatenmodelle legen fest, wie geometrische Informationen datentechnisch beschrieben werden. Für die Abbildung dreidimensionaler Geometriedaten können drei verschiedene Modelle verwendet werden [SPUR & KRAUSE 1997]:

- Linienmodelle
- Flächenmodelle
- Volumenmodelle

Das einfachste und älteste Modell ist das Linienmodell. Hier werden nur die Kanten eines dreidimensionalen Objektes gespeichert. Um auch gekrümmte Flächen darstellen zu können, wurden Flächenmodelle (auch als B-Rep¹¹ bezeichnet) eingeführt. Noch weiter geht das Volumenmodell (auch als CSG¹² bezeichnet), das auch das mit Material gefüllte Volumen eines modellierten Körpers berücksichtigt, womit boolesche Operationen einfach realisiert werden können. Heutige CAD-Systeme setzen auf Hybridmodelle, die eine Kombination aus den beschriebenen Geometriemodellen darstellen. Allen Modellen gemeinsam ist die vektorbasierte Speicherung der Geometrieinformationen. Im Gegensatz zu Punktwolken, die beispielsweise ein abgetastetes Modell über eine Vielzahl von Messpunkten repräsentieren, stellt das Vektorformat eine vollständige mathematische Beschreibung des abgebildeten Körpers dar.

Neben den reinen Geometriedaten können Produktmodelle darüber hinaus auch weitere Informationen mit Geometriebezug beinhalten wie beispielsweise Toleranzmodelle. Kommerzielle CAD-Systeme verwenden in der Regel ein proprietäres Datenmodell, wodurch der Datenaustausch mit anderen Systemen erschwert wird. Aus diesem Grund existieren standardisierte Austauschformate wie STEP, IGES oder VDA-FS.

Im Detail unterscheiden sich die Datenmodelle für CAD auf der einen und Virtual- bzw. Augmented-Reality-Anwendungen auf der anderen Seite. Während der Fokus bei CAD auf der exakten Beschreibung von Bauteilen einschließlich Fertigungshinweisen wie Toleranzen und Werkstoffangaben liegt, steht bei Virtual und Augmented Reality die Darstellung in Echtzeit im Vordergrund. Auch 3D-Design-Software (CAID) ist vorrangig auf hochwertige Darstellung statt auf exakte Produktbeschreibung ausgelegt. Die unterschiedlichen Schwerpunkte führen zu inkompatiblen Dateiformaten. Daraus resultiert die Notwendigkeit, Daten zu konvertieren um sie in einem anderen 3D-Programm weiterzuverwenden. Dazu werden geeignete Konvertierungswerkzeuge benötigt, deren Ergebnisse ggf. noch nachbearbeitet werden müssen.

In frühen, konzeptionell geprägten Phasen der Produktentwicklung liegen die erarbeiteten Gedanken, Ideen und Konzepte mit einer großen Unschärfe vor. Die vagen Festlegungen

¹¹ Abkürzung für den englischen Begriff „Boundary Representation“

¹² Abkürzung für den englischen Begriff „Constructive Solid Geometry“

müssen erst durch weitere Arbeitsschritte wie beispielsweise eine Auslegungsrechnung in exakte Maße überführt werden. Auch wenn in einem CAD-System in einem ersten Schritt nur ungefähre Maße abgebildet werden sollen, muss dennoch für jedes Maß ein exakter Wert angegeben werden, der eigentlich einen Wertebereich repräsentiert. Mit Stift und Papier kann man dahingegen unscharfe Ideen schnell und ohne Berücksichtigung von Maßangaben aufskizzieren. Aus diesem Grund stellen Papierskizzen für Konzeptideen in frühen Phasen weiterhin das geeignetere Medium dar, um unscharfe Geometrieinformationen schnell und einfach festzuhalten und auch zu verfestigen. Unschärfe ist von hoher Bedeutung für die frühen Phasen, da dadurch auch auf höheren Abstraktionsgraden gearbeitet werden kann. Darüber hinaus fördern die aus der Unschärfe resultierenden Interpretationsspielräume kreative Mechanismen bei der Problemlösung.

Traditionelle Datenmodelle bilden exakte Werte ab und passende Algorithmen führen exakte Rechenoperationen aus. Unschärfe Informationen können auf diese Weise nicht gespeichert und verarbeitet werden. Prinzipiell ist es aber durchaus möglich, Unschärfe digital zu verarbeiten, allerdings ist dies gegenüber der traditionellen, auf exakten Daten basierenden Vorgehensweise mit einem erhöhten Aufwand verbunden. Im Rahmen der Forschung zu künstlicher Intelligenz wurden diverse Ansätze zum rechnergestützten Umgang mit unscharfen Daten entwickelt: Beispiele dafür sind Fuzzy-Logik, Neuronale Netze sowie genetische und evolutionäre Algorithmen. Diese Verfahren sind primär Berechnungsverfahren, die es ermöglichen, aus exakten Eingangsdaten Lösungsräume statt einer exakten Lösung zu generieren. AMFT [2003] identifiziert in seiner Arbeit zur Integration von Gestaltung und Berechnung den Bedarf eines unscharfen Datenübertrags zwischen exakten Berechnungsdaten und exakten CAD-Daten, für den er die Verfahren der künstlichen Intelligenz als nicht geeignet bewertet. Stattdessen führt er eine zweite Berechnungsebene ein und verwendet für den Datenübertrag die Unschärfemechanismen Rundung, Stufensprünge, Lösungsräume und Kontrollmechanismen.

Auch für die Entwicklung von Datenmodellen, die unscharfe Geometrieinformationen unterstützen, bieten Berechnungsverfahren wie Fuzzy-Logik keine Hilfestellung. Prinzipiell stellt sich die Aufgabe, unscharfe Daten mittels exakter Daten zu verwalten ohne die Unschärfe dabei zu verlieren. Unschärfe bedeutet einen Interpretationsspielraum für die spätere Festlegung exakter Daten. Eine Möglichkeit ist daher, den Interpretationsspielraum mit in das digitale Datenmodell mit aufzunehmen und mittels Intervallarithmetik zu verarbeiten. Dabei stellt sich allerdings die Frage nach der jeweiligen Größe des Interpretationsintervalls, das in diesem Fall auch ein exaktes Maß besitzen müsste.

Eine andere Möglichkeit besteht darin, die Interpretation dem Ersteller bzw. Betrachter zu überlassen, wie dies auch bei der Papierskizze der Fall ist. Während eine gerade Linie in einem CAD-System durch einen Vektor zwischen Anfangs- und Endpunkt beschrieben wird, ist eine gerade Linie auf einer Handskizze zunächst eine Vielzahl von Farbpartikeln auf dem

Papier, die nicht notwendigerweise exakt auf der Verbindung zwischen Anfangs- und Endpunkt liegen. Um diese Eigenschaft der Papierskizze in einem digitalen Datenmodell zu erhalten, müssen die Geometriedaten mit einer höheren Auflösung gespeichert werden. Eine Möglichkeit ist die Verwendung eines pixel- oder voxelbasierten Datenformats, wie es beispielsweise bei der virtuellen Tonmodellierung [LÜDDEMANN 1996] zum Einsatz kommt. Alternativ könnten Linien statt durch Geraden auch durch komplexere Funktionen zwischen ihren Anfangs- und Endpunkten beschrieben werden, die die Abweichungen von der Ideallinie beim händischen Skizzieren abbilden.

Ein derartiges hochaufgelöstes Geometriedatenmodell bietet auf der einen Seite die Möglichkeit, Gedanken einfach in digitalen Skizzen festzuhalten. Auf der anderen Seite fehlen dadurch aber auch die semantischen Informationen, die beispielsweise eine Linie als solche auszeichnen. Digitale hochaufgelöste Skizzen müssen genauso wie Papierskizzen in nachfolgenden Arbeitsschritten weiter ausgearbeitet werden. Dabei sind zwei Schritte zu unterscheiden: zum einen muss die Auflösung auf ein geeignetes Minimum verringert werden, was bei pixel- bzw. voxelbasierten Skizzen mit einer Vektorisierung einhergeht. Zum anderen muss die Unschärfe durch eine gedankliche Weiterentwicklung des Modells verringert werden, so dass exakte Festlegungen der Maße des zu modellierenden Objektes möglich sind und diese im Datenmodell abgebildet werden können. Für zweidimensionale Skizzen, die in einem pixelbasierten Format vorliegen, existieren Verfahren zur Vektorisierung, die aber nicht immer zufrieden stellende Resultate liefern.

Unabhängig von der konkreten geometrischen Auflösung ist der Aspekt der Vollständigkeit der im Datenmodell abgelegten Informationen. Die heute gebräuchlichen Datenmodelle sind stark Geometrie- und Ergebnisfixiert. Über die Geometrie hinausgehende Hintergrundinformationen zur Entstehungsgeschichte eines Modells, die die Gestaltung für Außenstehende nachvollziehbarer machen, können zwar mit den Geometriedaten verknüpft werden [IRLINGER 1999], von dieser Möglichkeit wird jedoch kaum Gebrauch gemacht.

Ein umfassendes Geometriedatenmodell, das neben den exakten Geometriedaten auch unscharfe Geometrieinformationen verwalten kann, existiert noch nicht. Die mittels der beschriebenen Ansätze festgehaltenen unscharfen Geometrieinformationen sind unabhängig von den Datenmodellen gebräuchlicher CAD-Systeme und können somit nicht direkt weiterverarbeitet werden. Sinnvoll wäre eine integrierte Lösung, die die Weiterverarbeitung unscharfer Geometriedaten in exakte Modelle unterstützt und dabei die Relation zu den unscharfen Ursprungsdaten aufrechterhält.

2.3.5 Digitales Skizzieren und Modellieren in frühen Phasen

Der Fokus von CAD liegt nicht primär in der Unterstützung früher Phasen der Produktentwicklung. Da CAD-Systeme mit exakten Maßen arbeiten, können sie erst ab dem Zeitpunkt eingesetzt werden, an dem entsprechende Informationen verfügbar sind. Um bereits vorher ohne Einschränkung der Kreativität von den Vorteilen digitaler Werkzeuge profitieren zu können, müssen für diese Bedürfnisse angepasste, separate Werkzeuge verwendet werden, die mit unscharfen Geometrieinformationen umgehen können. Die interne Verwaltung der Geometriedaten erfolgt in solchen Werkzeugen zwar auch auf Basis exakter Daten, jedoch ist die Angabe exakter Maße nicht erforderlich. Statt wie in einem CAD-System z. B. ein Rechteck über die exakten Koordinaten seiner Eckpunkte zu definieren, würde in einem digitalen Skizzierwerkzeug der komplette Linienverlauf detailliert gespeichert werden. Damit liegen die Daten in einer sehr hohen Genauigkeit vor. Die abstrakte geometrische Information, dass es sich um ein Rechteck mit bestimmten Maßen handelt, ist darin allerdings nicht enthalten.

In diesem Teilkapitel wird ein Überblick über den aktuellen Stand der Technik derartiger Werkzeuge gegeben. Neben Systemen zur Anfertigung zweidimensionaler digitaler Skizzen werden zahlreiche auf Virtual-Reality-Technologien aufbauende Modellierungsprogramme vorgestellt.

Ein sehr pragmatischer Ansatz, Skizzen digital verfügbar zu machen, ist das nachträgliche Einscannen von auf Papier angefertigten Skizzen. Die so generierten Dateien können dann beispielsweise als Hintergrund ins CAD-System geladen werden und dort als Vorlage für die exakte Modellierung dienen. Einen Schritt weiter gehen Systeme, die direkt die Skizzierbewegungen des Benutzers erfassen und verarbeiten. Statt des Papiers kommen spezielle stiftbasierte Eingabegeräte zum Einsatz. Hier können zwei Arten unterschieden werden: Einfache Geräte besitzen eine mit Sensoren ausgestattete Fläche, die die Bewegungen mit einem speziell dafür vorgesehenen Stift erkennen kann¹³. Aufwendigere Geräte integrieren die Sensorik in ein Display und können somit die Stiftbewegungen direkt am Ort des Entstehens anzeigen. Zu dieser Kategorie zählen Graphiktablets¹⁴ [SCHWANKL 2002], aktuelle stiftbasierte PDAs und Smartphones¹⁵ sowie Mobilcomputer nach der Tablet-PC-Spezifikation von Microsoft®. Eine frühe Realisierung eines derartigen Displays für die Erzeugung zweidimensionaler Skizzen stellt das Clear Board von Ishii und Kobayashi dar, dessen Fokus weniger in der Weiterverarbeitung sondern in der verteilten kollaborativen Arbeit an einer gemeinsamen Skizze liegt [KOBAYASHI & ISHII 1993]. Für Tablet PCs gibt es in Anlehnung an die integrierte

¹³ Ein Beispiel dafür wäre die Intuos-Serie der Firma Wacom.

¹⁴ Ein Beispiel dafür wäre die Cintiq®-Geräte der Firma Wacom.

¹⁵ Smartphones, zu deutsch etwa „schlaue Telefone“, vereinen den Leistungsumfang eines PDAs mit einem Mobiltelefon

Schrifterkennungssoftware auch Programme wie Corel Grafigo, die Skizzen während der Eingabe vektorisieren und damit in nachgelagerten Prozessschritten leichter verarbeitbar machen als pixelbasierte Dateien.

Neben Skizzen werden vor allem im Design-Bereich häufig physische Modelle erstellt. Auch hier besteht die Möglichkeit, durch Abtasten oder Laserscannen digitale Geometriedaten zu erzeugen. Möchte man, statt mit Modellbauwerkstoffen zu hantieren, direkt ein virtuelles Modell generieren, benötigt man spezielle Rechnersysteme. Im Folgenden werden die wesentlichen Modellierungssysteme für den Einsatz in frühen Phasen vorgestellt. Größtenteils basieren diese Systeme auf Virtual-Reality-Technologien.

Einen sehr einfachen Ansatz, dreidimensionale Objekte zu modellieren verfolgt Igarashi mit der Software „Teddy“ [IGARASHI ET AL. 1999]. Mit einer Standard-2D-Maus oder auf einem Grafiktablett erzeugte Linien werden von dieser Software zu dreidimensionalen Flächenmodellen erweitert, die dann intuitiv in ihrer Form veränderbar sind. Diese Software dient auch dem Prototyp einer Internet-Suchmaschine für 3D-Modelle als Eingabeinterface [MIN 2004]. Stark verrundete Körper wie beispielsweise Trickfilmfiguren lassen sich mit Teddy sehr leicht und schnell erzeugen, wohingegen eher kantige technische Objekte diesem System Schwierigkeiten bereiten. Eine Weiterentwicklung von Teddy stellt die Software „Chateau“ dar [IGARASHI & HUGES 2001], die dem Benutzer nach wenigen Strichen verschiedene darauf aufbauende 3D-Geometrien zur Auswahl anbietet.

Stärker an Grundgeometrien orientiert sich das System SKETCH [ZELEZNIK ET AL. 1996], das mit einer Drei-Tasten-Maus und Gestenerkennung arbeitet. Mit entsprechenden Gesten können Zylinder, Kegel, kubische Körper, Kugeln, Rotationskörper, gezogene Körper, Röhren, Freiformhüllkurven und Prismen erzeugt und diese verknüpft und gruppiert werden. Ähnlich funktioniert auch „Virtual Lego“ von Oh und Stürzlinger, bei dem als Grundgeometrien virtuelle Lego-Bausteine zum Einsatz kommen und mit Hilfe eines 2D-Eingabegeräts zusammengebaut werden können [OH & STUERZLINGER 2003].

Das Ziel, CAD-Systeme geeigneter für die frühen Entwicklungsphasen zu machen, verfolgte Pentland mit seinem System SuperSketch [PENTLAND 1987]. Dieses System erlaubte es Benutzern einfache Geometrien zu deformieren und miteinander zu verbinden. Für eine wirklichkeitsnahe Interaktion mit virtuellen 3D-Objekten entstand der Bedarf nach einem 3D-Eingabegerät. Eines der ersten derartigen Geräte war die sechs Freiheitsgrade besitzende Maus „the Bat“ [WARE & JESSOME 1988], die auf der Basis elektromagnetischer Felder arbeitete. Derartige Eingabegeräte setzten sich schnell durch, da sie im Vergleich zu mechanischen Trackingsystemen keine eingeschränkte Bewegungsfreiheit besitzen und das dargestellte Bild nicht verdecken.

Mit einem Stift und einem Tablett als Eingabegeräte arbeitet das System GIDeS (Gesture based intuitiv Design System). Ziel der Entwickler dieses Systems war es, den Konstrukteur in

den frühen Phasen des Entwerfens beim Skizzieren zu unterstützen und ihn in seiner natürlichen Arbeitsweise zu fördern. Das Gesteninterpretationssystem erkennt bestimmte Gesten und unterbreitet dem Benutzer Vorschläge von zugeordneten 3D-Geometrien, die angenommen oder abgelehnt werden können. Ähnlich funktioniert auch der „Translucent Sketchpad“ [ENCARNAÇÃO ET AL. 1999], der eine durchsichtige Tafel und einen durchsichtigen Stift verwendet. Ikonische Gesten, die der Projektion der gewünschten Geometrie ähneln, lösen die Erzeugung von 3D-Geometrien im Rechner und deren Darstellung aus. Ebenfalls von zweidimensionalen Ausgangsdaten geht Lipson aus [LIPSON 1998]. Das von ihm entwickelte System berechnet aus perspektivischen 2D-Darstellungen die entsprechenden dreidimensionalen Objekte, die dann in Folgeprozessen weiterverarbeitet werden können.

Das kraftreflektierende 3D-Eingabegerät PHANTOM® wird vom System inTouch [EHMANN ET AL. 2001] verwendet. Der Schwerpunkt bei dieser Anwendung liegt weniger in der Neuerzeugung von Geometrien als vielmehr in der Optimierung bestehender Entwürfe. So kann beispielsweise die Oberfläche von Modellen mit Hilfe des Eingabegeräts verformt werden. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, Oberflächen zu bemalen oder mit Texturen zu belegen. Die Übertragung der im Automobildesign eingesetzten Technik des „Tapedrawing“ in die virtuelle Realität ist Gegenstand der Arbeiten von [GROSSMANN ET AL. 2001]. Zwei mit Druckknöpfen versehene Trackingsysteme werden in der linken und der rechten Hand gehalten und ermöglichen es ein virtuelles Klebeband aufzuziehen und zu verändern. Das virtuelle Tapedrawing findet in einer definierten Ebene statt, die mit Hilfe eines Schiebereglers orthogonal verschoben werden kann. Auf diese Weise wird ein Drahtmodell entworfen, das aus beliebigen Blickwinkeln betrachtet werden kann.

Eine Kombination aus bereits beschriebenen Ansätzen stellt das Programm 3-Draw [SACHS ET AL. 1991] dar, mit dem ebenfalls 3D-Drahtmodelle erstellt werden können. Auch hier kommen Stift und Tablett als Eingabegeräte zum Einsatz, allerdings wird von beiden die jeweilige Position im Raum erfasst. Durch eine Änderung der Orientierung des Tabletts ändert sich auch der Blickwinkel auf das dargestellte Objekt. Der Stift dient als Zeichengerät und als Editierwerkzeug für zahlreiche Bearbeitungsfunktionen. Ebenfalls mit einem 3D-Trackingsystem arbeitet SCHMANDT [1983]. Statt auf einem zweidimensionalen Tablett zu arbeiten wird hier ein dreidimensionaler Arbeitsraum unterhalb eines halbversilberten Spiegels realisiert. Mit Hilfe eines um 45° nach vorne gekippten Monitors erscheint das generierte 3D-Objekt unmittelbar im Interaktionsraum. Interferenzen zwischen den Magnetfeldern von Monitor und Trackingsystem sowie Zeitverzögerungen zwischen Eingabe und Darstellung erschweren das interaktive Arbeiten.

Als eines der ersten Modellierprogramme setzte das System 3DM [BUTTERWORTH ET AL. 1992] mit einem Head Mounted Display eine immersive VR-Technik ein. Es ist in der Lage, Geometrien aus Primitiven zusammensetzen, Freiformflächen aus Dreiecksflächen zu mo-

dellieren sowie im virtuellen Raum zu navigieren. Einen großflächigen Projektionstisch, „Responsive Workbench“ genannt, nutzt das System „Surface Drawing“ [SCHKOKNE ET AL. 2001]. Mit einem Datenhandschuh können intuitiv in Echtzeit triangulierte Flächen erzeugt werden. Ein getrackter Stift in der anderen Hand dient dazu, Orientierung und Position zu verändern.

Statt auf die Modellierung von Draht- oder Flächenmodellen setzt das System zur virtuellen Tonmodellierung der TU Berlin [LÜDDEMANN 1996] auf die Erzeugung von Volumenkörpern. Mit virtuellen Werkzeugen können über substraktive bzw. additive Verfahren Voxelmodelle geformt werden. Das System unterstützt verschiedene 3D-Eingabegeräte mit und ohne Krafrückkopplung [KRAUSE & BIAHMOU TCHEBETCHOU 2002]. Reale Modelle und Prototypen mit computergenerierten Informationen anzureichern ist Zweck des Systems SketchAR [STORK 2003]. Dazu bedient es sich mit einem semitransparenten Head Mounted Display und einem kamerabasierten Trackingsystem Technologien aus dem Bereich Augmented Reality. Bei den angedachten Einsatzszenarien Design Review und virtuelles Tapedrawing können durch Handbewegungen erzeugte virtuelle Linien dem optischen Eindruck des realen Modells überlagert werden.

Die Systeme COVIRDS und DVDS [ARANGARASAN ET AL. 2000] unterstützen das konzeptuelle Entwerfen. Eingabegeräte sind zwei getrackte Datenhandschuhe, die Ausgabe erfolgt in Stereo auf einer großen Leinwand. Dadurch können auch mehrere Personen gleichzeitig den Konstruktionsprozess verfolgen bzw. an ihm beteiligt sein. DVDS besitzt eine Schnittstelle zu einem CAD-System, so dass in DVDS erzeugte Objekte weiterverarbeitet werden können. Auch das System ErgoDesk [FORSBERG ET AL. 1998], eine Weiterentwicklung von SKETCH, bietet eine stereoskopische Darstellung. Statt mit einer Maus wird hier mit einem Stift direkt auf die Oberfläche eines virtuellen Tisches gezeichnet. Neben den bekannten 2D-Gesten zur 3D-Geometrieerzeugung und Werkzeugauswahl kann auch ein Spracherkennungssystem genutzt werden. Die Navigation innerhalb des virtuellen Raumes erfolgt durch einen Trackingsensor in der nicht-dominanten Hand.

Eine Integration von CAD- und VR-Technologien strebt das System ARCADE/VT (Advanced Realism CAD Environment at the Virtual Table) an, das am Fraunhofer Institut für Graphische Datenverarbeitung (IGD) in Darmstadt entwickelt wurde. Auch hier wird ein getrackter Stift in Verbindung mit einem ebenfalls getrackten durchsichtigen Pad für die Eingabe verwendet. Die Ausgabe kann wahlweise auf einen Standardmonitor oder einen Projektionstisch – jeweils in Kombination mit Shutterbrillen – sowie auf ein getracktes Head Mounted Display erfolgen. Um sowohl eine Interaktion in Echtzeit als auch mathematisch exakte Modelle zu gewährleisten, werden rechnerintern parallel zwei entsprechende Datenmodelle verarbeitet, die nach Beendigung jeder Interaktion synchronisiert werden.

Verschiedene vom Fraunhofer Institut für Arbeitswissenschaft und Organisation (IAO) in Stuttgart entwickelte Modellersysteme werden in [DEISINGER ET AL. 2000] vorgestellt: Der einfache Volumenmodellierer NAEGELI RT basiert auf der Spraydosen-Metapher. Mit Hilfe einer virtuellen Spraydose kann der Benutzer sein 3D-Modell in den Raum sprühen. Das Bedienkonzept ist sehr spartanisch: Neben dem Erzeugen von virtueller Substanz gibt es lediglich eine Löschfunktion. Das System LOTUS verwendet in Anlehnung an die Papier-Bleistift-Metapher die virtuellen Werkzeuge bzw. -stoffe Papier, Schere und Klebstift. Damit ist es möglich, einfache Polygone zu erzeugen. Durch Verschieben, Duplizieren und Verbinden können komplexere Geometrien erzeugt werden. Stärker an der Funktionalität von CAD-Programmen orientiert sich der vom Fraunhofer Institut für Medienkommunikation (IMK) entwickelte FreeDrawer, der auch als VE-CAD bezeichnet wird [WESCHE ET AL. 2001]. Basierend auf einem Gerüst von Kurven im Raum, die mit einem 3D-Eingabegerät erstellt wurden, generiert die Modelliersoftware automatisch ein Netz und berechnet dann die Oberfläche als Annäherung an dieses Netz. Die mathematische Repräsentation der Kurven und Flächen wird vor dem Designer verborgen. Es ist möglich, die erzeugten Flächen mit Deformationstools zu verformen.

2.3.6 Prozessintegration

Die Integration von Rechnerwerkzeugen in den Produktentstehungsprozess ist heutzutage weit fortgeschritten und umfasst nahezu alle Arbeitsschritte, von der Anforderungsdokumentation angefangen über Funktions- und Geometriemodellierung bis zur Fertigungsplanung. Allerdings haben sich historisch für die verschiedenen Bereiche unabhängig voneinander unterschiedliche Softwaresysteme entwickelt, wodurch der Aufbau von Prozessketten erschwert wurde. Für die Kopplung heterogener Systeme zu Prozessketten ist die Definition und Implementierung von entsprechenden Schnittstellen Voraussetzung. Bei zunehmender Komplexität stößt die Schnittstellenlösung allerdings an ihre Grenzen [ANDERL 1993]. Integrierte Prozessketten lösen dieses Problem durch ein applikationsübergreifendes Produktdatenmodell, das idealerweise in einem EDM-System verwaltet wird [SPUR & KRAUSE 1997].

Im Folgenden wird auf die Prozesskette der Modellierung und Weiterverarbeitung von Geometriedaten eingegangen, da diese ein wesentliches Element des Produktentwicklungsprozesses darstellt und hier bereits umfassende rechnerbasierte Lösungen realisiert wurden. Kernbaustein der Geometriemodellierung ist das CAD-System. Die Basis für die Geometriemodellierung im CAD-System stellen Skizzen und Design-Modelle dar. Skizzen werden in der Regel manuell ins CAD-System übertragen. Der Einsatz von Vektorisieralgorithmen bringt wegen der Notwendigkeit zur Nacharbeit hier keine Vorteile [ZIEGLER 1995]. Anders sieht es bei der Überführung von Freiformflächen aus Design-Modellen aus: Ein manueller Übertrag wäre hier sehr zeitaufwendig und schwierig. Dadurch lohnen sich Verfahren des Reverse Enginee-

ring zur digitalen Erfassung und Weiterverarbeitung von Design-Modellen. Mechanisch oder optisch erfasste Punktwolken werden durch geeignete Algorithmen der Flächenrückführung [z. B. WELLER 2000] in mathematisch beschreibbare Flächen¹⁶ überführt, die die Grundlage zur Weiterverarbeitung in CAD-Systemen darstellen [LANDWEHR 1998]. Bei hohen Ansprüchen an die Flächenqualität wie beispielsweise im Automobildesign ist vor der Weiterverarbeitung im CAD-System ein manueller Optimierungsprozess, Straken genannt, erforderlich.

Nach Abschluss der Geometriemodellierung im CAD-System können die dort erzeugten Produktdaten in der Prozesskette weiterverarbeitet werden. Bereits während des Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses dienen CAD-Daten als Basis für Berechnung, Simulation und VR/AR-Visualisierung. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse fließen wieder zurück in die Entwicklung bzw. Konstruktion und führen zu einer Überarbeitung des ursprünglichen CAD-Modells. Das endgültig freigegebene CAD-Modell ist die Basis für die Produktionsplanung. Mittels CAD/CAM-Schnittstellen können die Daten in die Produktionsplanungssysteme übernommen und um produktionstechnische Informationen wie beispielsweise Werkzeugverfahrwege ergänzt werden.

In den dem CAD-Einsatz vorgelagerten Arbeitsschritten der Konzept- und Formgestaltung sind herkömmliche nicht-digitale Werkzeuge weiterhin vorherrschend. Insbesondere Papierskizzen unterstützen kreative Prozesse und erlauben das schnelle Festhalten vager Vorstellung hinsichtlich der Produktgestalt. Aktuelle digitale Skizzierwerkzeuge stellen noch kein adäquates Gegenstück zur Handskizze dar und werden daher kaum eingesetzt. Die frühen Phasen der Geometriemodellierung sind somit selten in die digitale Prozesskette integriert. Der daraus resultierende Medienbruch macht einen manuellen Übertragungsschritt notwendig, der auf der einen Seite mit Aufwand verbunden ist, auf der anderen Seite eine Reflexion und Konkretisierung des Entwurfes ermöglicht bzw. erzwingt.

Neben dem Medienbruch zu Beginn der digitalen Prozesskette existieren in der heutigen Praxis weitere Brüche innerhalb der digitalen Prozesskette (Abbildung 2-13). Zahlreiche Software-Werkzeuge benötigen CAD-Modelle als Eingangsdaten, verwenden jedoch ein separates Produktmodell. Beispiele dafür sind FEM-Berechnungsprogramme und Virtual- bzw. Augmented-Reality-Anwendungen. Mit diesen Programmen kann erkannter Änderungsbedarf nicht umgesetzt werden, stattdessen muss auch hier ein manueller Übertrag zurück zum CAD-System erfolgen. Es handelt sich also um unidirektional gekoppelte digitale Prozessketten. Durch die Integration der Funktionalität separater Software ins CAD-System wird versucht, diese Problematik zu umgehen und eine durchgängige Unterstützung zu realisieren.

¹⁶ Die mathematische Beschreibung der Flächen erfolgt durch Polynomfunktionen wie B-Splines, NURBS oder Bézierkurven. Triangulierte Flächen sind für die Weiterverarbeitung in CAD-Systemen nicht geeignet.

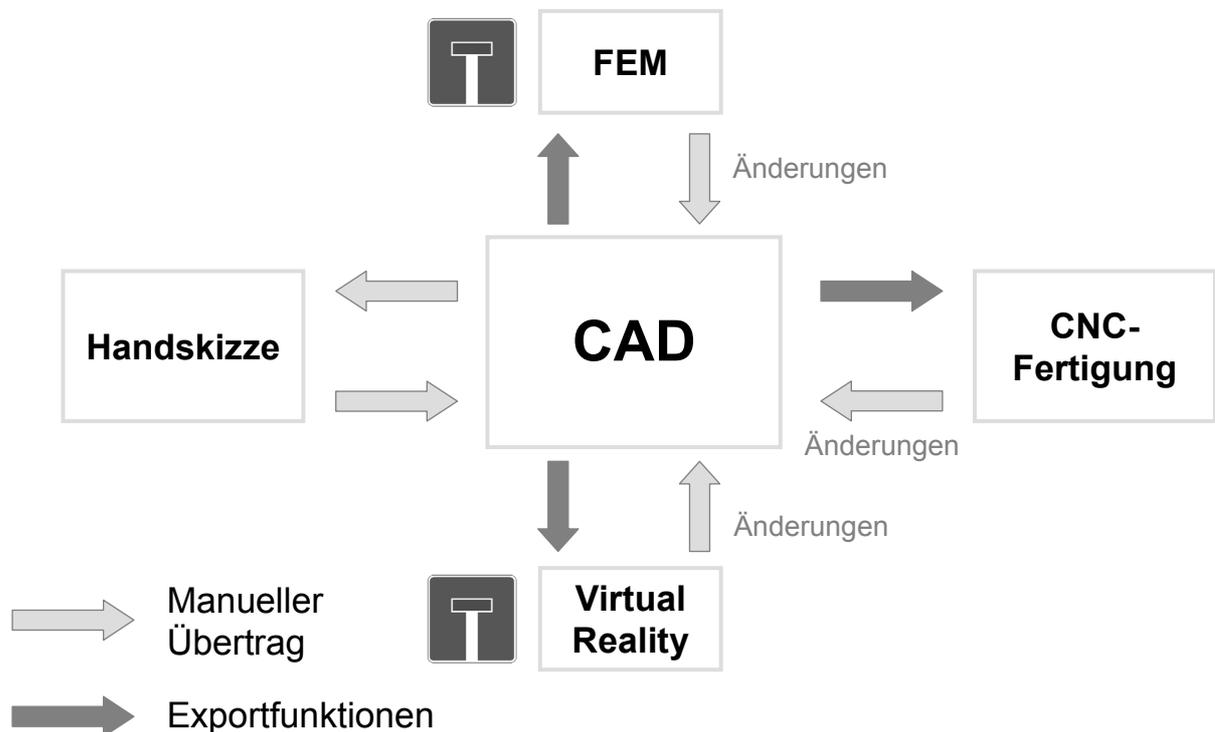


Abbildung 2-13: Datenaustausch in der Prozesskette zur Verarbeitung von Geometrieinformationen

2.4 Ableitung von Forschungsbedarf

Auf Basis des beschriebenen Stands der Forschung und der Technik und vor dem Hintergrund der in Kapitel 1.2 aufgezeigten Problemstellung werden in diesem Teilkapitel die Stärken und Schwächen bestehender Werkzeuge analysiert und die Kernprobleme identifiziert. Daraus wird Forschungsbedarf in Richtung neuer Werkzeuge zur Geometriemodellierung abgeleitet und der Forschungsansatz dieser Arbeit beschrieben.

2.4.1 Stärken und Defizite bestehender Werkzeuge

Die kreativen Prozesse bei der Problemlösung werden durch die verschiedenen verfügbaren externen Darstellungsmedien unterschiedlich gut unterstützt. Das Medium, das derartige Prozesse derzeit am besten unterstützt, ist die Handskizze. Wesentliche Problemlösestrategien wie Abstraktion und Konkretisierung oder Wechsel der Codierung werden von Skizzen unterstützt. Vage, ungefestigte Gedanken können in einer Skizze schnell festgehalten werden und dienen als Grundlage für eine weitere Auseinandersetzung mit der gestellten Aufgabe. Festlegungen können sowohl bildlich als auch verbal vorgenommen werden. Der im Vergleich zu CAD signifikant häufigere Einsatz von Handskizzen in frühen Phasen der Produktentwicklung [RÖMER ET AL. 2001] lässt darauf schließen, dass mittels Skizzen das mentale Modell im

Kopf des Entwicklers/Konstrukteurs leichter abgebildet werden kann. Dies betrifft sowohl die inhaltliche Abbildung des mentalen Modells, als auch die dafür erforderliche Handlung.

Da der Mensch durch die visuelle Wahrnehmung mit zwei Augen über eine räumliche Wahrnehmung verfügt, ist es möglich, dass das mentale Modell eines dreidimensionalen Objektes nicht nur rein zweidimensional ist, sondern auch über Tiefeninformationen verfügt. Papier-skizzen sind jedoch nur auf zwei Dimensionen beschränkt. Um das mentale Modell einer dreidimensionalen Problemstellung auf einer Skizze darstellen zu können, muss es daher entweder auf eine oder mehrere Schnittansichten transformiert werden oder alternativ als perspektivische Darstellung gezeichnet werden. Beide Möglichkeiten beanspruchen allerdings mentale Kapazität, die nicht für kreative Prozesse eingesetzt werden kann. Für die Anwendung beider Darstellungsarten ist zunächst ein initialer Lernprozess erforderlich. Im Gegensatz zum Denken und Arbeiten in Schnitten ist die Fähigkeit zum Anfertigen perspektivischer Darstellungen bei Ingenieuren weniger verbreitet als beispielsweise bei Industriedesignern. Eine weitere Schwäche von Skizzen ist die fehlende Integration in die digitale Prozesskette der Produktentwicklung. Dies führt zur Notwendigkeit eines manuellen Übertrags der auf Skizzen festgehaltenen Ergebnisse in ein CAD-System. Eine dauerhafte Verknüpfung zwischen CAD-Modell und der Ursprungsskizze kann dabei kaum realisiert werden. Die Übertragung beschränkt sich hauptsächlich auf Geometriedaten, somit besteht die Gefahr des Verlustes von verbal und symbolisch in der Papierskizze festgehaltenen Informationen.

Die starke Verwendung von Skizzen in frühen Phasen der Produktentwicklung ist ein Indiz dafür, dass es dafür noch keine zufrieden stellende Rechnerunterstützung gibt. Akutelle CAD-Systeme arbeiten mit exakten Abmessungen und bieten damit nicht die Unschärfe, die einer Handskizze innewohnt. Damit sind sie für die Externalisierung eines vagen mentalen Modells während des kreativen Problemlöseprozesses weniger geeignet, da gedankliche Vorstellungen erst konkretisiert werden müssen, um sie mittels CAD festhalten zu können. Dazu kommt, dass CAD-Systeme immer noch über ein Verbesserungspotenzial hinsichtlich ihrer Bedienbarkeit verfügen. Die Bedienung aktueller CAD-Systeme ist umständlich und ähnlich einer Fremdsprache aufwendig zu erlernen. Diese Gründe sind ausschlaggebend für die mangelnde Eignung von CAD-Systemen in frühen Phasen.

Virtual-Reality-Technologien bieten das Potenzial für einen intuitiveren Umgang mit digitalen Modellen dreidimensionaler Objekte. Allerdings konkurrieren verschiedene Eingabewerkzeuge und Bedienkonzepte um die Gunst des Anwenders und verhindern somit ein systemübergreifendes Bedienkonzept wie es beispielsweise WIMP (Windows Icons Menus Pointer) für zweidimensionale grafisch Benutzerschnittstellen darstellt. Auch ermöglicht die Darstellungsqualität aktueller Virtual- und Augmented-Reality-Systeme noch kein Arbeiten über einen längeren Zeitraum wie beispielsweise einen Arbeitstag.

Auf der anderen Seite besitzen digitale Werkzeuge eine Reihe von Vorteilen, die in den frühen Phasen nicht genutzt werden können:

- digitale Modelle können im Vergleich zu papierbasierten Skizzen und Zeichnungen sehr leicht geändert werden
- digitale Modelle können in einem EDM-System verwaltet werden
- aus einem einzigen volumenorientierten Geometriemodell lassen sich beliebige Schnitte und perspektivische Ansichten ableiten
- digitale Modelle können über geeignete Schnittstellen systemübergreifend ausgetauscht und weiterverarbeitet werden und machen somit manuelle Übertragungsschritte überflüssig

Diese Vorteile waren ausschlaggebend für die breite Einführung von CAD-Systemen in der Produktentwicklung.

Bestehende kommerzielle CAD-Systeme bieten keine oder nur rudimentäre Unterstützung von Virtual- und Augmented-Reality-Technologien. Bedingt durch die eingeschränkte Erweiterbarkeit der proprietären CAD-Systeme in diese Richtung existieren gängige Virtual- und Augmented-Reality-Softwaresysteme als eigenständige Lösungen. Ein Import von CAD-Daten ist möglich, allerdings ist eine Weiterverarbeitung und anschließende Rückübertragung ins CAD-System in der Regel nicht vorgesehen. Hauptanwendung von Virtual-Reality-Anwendungen im Ingenieurwesen ist derzeit die Visualisierung von Daten, die in der Regel mit CAD-Systemen erzeugt wurden. Eine Integration von CAD und VR/AR ist als erstrebenswert anzusehen, da dank einheitlichem Datenmodell die bestehende Datenaustausch- und Schnittstellenproblematik gelöst würde und die Vorteile beider Systeme gleichzeitig genutzt werden könnten.

Zahlreiche Projekte (siehe Kapitel 2.3.5) zeigen, dass Virtual- und Augmented-Reality-Technologien prinzipiell geeignet sind, eine Basis für Rechnerwerkzeuge zur Unterstützung der frühen Phasen der Geometriemodellierung darzustellen. Der Fokus der beschriebenen Systeme liegt im eher designorientierten Modellieren von Flächen und Volumen und weniger auf der Anfertigung linienbasierter technisch-funktionsorientierter Skizzen. Stiftbasierte Bedienkonzepte werden entweder in Verbindung mit 2D-Eingabetablets oder zur Oberflächen-deformation eingesetzt. Prinzipiell ließe sich mit Hilfe von Virtual- und Augmented-Reality-Technologien auch ein linienbasiertes dreidimensionales Skizzierwerkzeug realisieren, das eine Erweiterung der Papier-Bleistift-Metapher in den Raum darstellen würde, womit in frühen Phasen unscharfe Geometrieinformationen festgehalten und digital weiterverarbeitet werden könnten.

Bezüglich der Lage von Handlungs- und Wahrnehmungsraum zueinander bietet Virtual- und Augmented-Reality im Gegensatz zu klassischen CAD-Systemen die Möglichkeit, beide

Räume deckungsgleich zu realisieren. Damit wird eine wesentliche Eigenschaft der Papierskizze übernommen und somit eine intuitive Interaktion im dreidimensionalen Raum ermöglicht. Virtual- und Augmented-Reality-Technologien besitzen somit ein Potenzial, die Geometriemodellierung bereits in frühen Phasen zu unterstützen.

Der Medienbruch zwischen Papier und Rechner beim Übergang von Handskizze zu CAD ist zwangsläufig mit einem Konkretisierungsschritt verbunden, um die unscharfen Geometrieinformationen der Skizze in CAD-taugliche exakte Maße zu überführen. Rechnerunterstützte Skizzierwerkzeuge heben diesen Medienbruch auf. Die Notwendigkeit, in einem späteren Arbeitsschritt die Skizze zu konkretisieren, bleibt aber weiterhin bestehen. Bezüglich der Unterstützung des Konkretisierungsprozesses von digitalen Skizzen zu vollständig definierten Produktmodellen durch Softwarewerkzeuge besteht momentan ein Defizit. Im Vergleich zu Papierskizzen können digitale dreidimensionale Skizzen nicht einfach auf Papier ausgedruckt und neben den CAD-Arbeitsplatz gelegt werden. Ohne eine integrierte Lösung gestaltet sich dadurch die Weiterverarbeitung und Konkretisierung digitaler 3D-Skizzen schwieriger als mit Medienbruch.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass derzeitige Werkzeuge zur digitalen dreidimensionalen Geometriemodellierung kreative Problemlöseprozesse in frühen Phasen der Produktentwicklung unzureichend unterstützen. Die Kernprobleme dabei liegen zum einen in der unintuitiven Bedienung, zum anderen in der Modellierung auf Basis exakter Maße, die nicht zu den unscharfen, teilweise noch abstrakten Vorstellungen des mentalen Modells passen. Der daraus resultierende Forschungsbedarf zur Verbesserung digitaler Modellierungswerkzeuge wird im Folgenden erläutert.

2.4.2 Forschungsbedarf und Forschungsansatz dieser Arbeit

Die Erkenntnisse aus der Psychologie über kreative Mechanismen bei der Problemlösung haben sich noch nicht in passenden Rechnerwerkzeugen für frühe Entwicklungsphasen manifestiert. Eine intuitive Externalisierung des mentalen Modells in ein digitales Medium wird derzeit nicht ausreichend unterstützt. Daraus leitet sich der Forschungsbedarf ab, die Möglichkeiten, die Rechnerwerkzeuge und insbesondere die Virtual- und Augmented-Reality-Technologien bieten, zu nutzen um innovative Werkzeuge zur Überwindung der momentan bestehenden Probleme zu entwickeln.

Der in dieser Arbeit verfolgte Forschungsansatz ist die Gewinnung von Erfahrungen und Erkenntnissen auf Basis eines prototypischen Werkzeugs zur Anfertigung digitaler dreidimensionaler Skizzen. Damit soll eine fundierte Grundlage für die Entwicklung zukünftiger rechnerbasierter Geometriemodellierungswerkzeuge geschaffen werden. Basis dafür ist nicht nur der Transfer von Erkenntnissen über den Einsatz und die Eigenschaften von Papierskizzen, son-

dern auch praktische Erfahrungen mit der Erzeugung dreidimensionaler Skizzen. Mit dem prototypischen Werkzeug kann auch die dieser Arbeit zugrunde liegende Hypothese, dass digitale Werkzeuge zur Modellierung unscharfer Geometrieinformationen in frühen Phasen Vorteile gegenüber herkömmlichen Papierskizzen haben und einen Beitrag zur Optimierung von Produktentwicklungsprozessen leisten, überprüft werden. Die praktischen Erfahrungen mit einem derartigen Werkzeug ermöglichen es, die Anforderungen an zukünftige Werkzeuge zu konkretisieren. Im Folgenden soll detaillierter auf die bereits bekannten Anforderungen, die die Grundlage für die Entwicklung des prototypischen Demonstrators darstellen, eingegangen werden.

Ausgehend von der Erkenntnis, dass Handskizzen kreative Mechanismen weitaus besser unterstützen als CAD-Systeme, soll die Papier-Bleistift-Metapher als Basis für die Entwicklung zukünftiger Werkzeuge zur digitalen Modellierung unscharfer Geometrieinformationen dienen. Dabei sollen die positiven Eigenschaften von Papierskizzen übernommen werden, gleichzeitig aber die Einschränkung der Zweidimensionalität und die damit notwendige Umcodierung des mentalen Modells aufgehoben werden. Durch eine konsequente Übertragung der Papier-Bleistift-Metapher in einen dreidimensionalen Arbeitsraum kann dies erreicht werden. Dadurch können dreidimensionale, linienbasierte Skizzen erzeugt und wahrgenommen werden.

Auf diese Weise soll erreicht werden, dass die gesamte Bandbreite an in Skizzen festhaltbaren Informationen auch in digitalen dreidimensionalen Skizzen zur Verfügung steht. Neben Linien zur geometrischen Beschreibung von Objekten sind dies textuelle Informationen und Symbole wie Pfeile zur Darstellung beispielsweise von kinematischen Relationen. Damit wird ermöglicht, zwischen bildlichen und begrifflichen Darstellungsformen zu wechseln. Kreative Prozesse werden durch den Wechsel der Codierung stimuliert und somit unterstützt.

Die Einheit von Handlungs- und Wahrnehmungsraum der Papierskizze soll auch in zukünftigen digitalen Skizzierwerkzeugen erhalten bleiben. Dies ermöglicht das direkte Zeigen mit dem Stift auf bereits skizzierte Skizzenelemente sowie das Probehandeln darin. Auf diese Weise können sich mentales Modell und dargestellte Skizze sinnvoll ergänzen und beispielsweise die Bewertung von Lösungsalternativen beschleunigen, da nur Teile davon skizziert werden müssen.

Ergänzend zur Adaption der vorteilhaften Eigenschaften von Papierskizzen soll ein zukünftiges Werkzeug auch über die Vorteile bestehender Systeme zur digitalen Geometriemodellierung verfügen. Während eine perspektivische Darstellung auf einer Papierskizze ein Objekt aus genau einem Blickwinkel zeigt, bieten digitale Werkzeuge die Möglichkeit, Objekte durch Rotation und Translation aus sämtlichen Blickwinkeln zu betrachten. Der Wechsel der Perspektive verbessert die räumliche Vorstellung vom betrachteten Objekt.

FERGUSON [1993] schreibt über physische Modelle, dass ein Beobachter durch sie einen Schritt näher an die Wirklichkeit heran geführt wird, als durch eine Zeichnung. Mit dem prototypischen Skizzierwerkzeug auf Basis der genannten Anforderungen wird versucht, eine Brücke zwischen diesen beiden Darstellungsformen zu schlagen. Dreidimensionale Skizzen können analog zu physischen Modellen problemlos aus sämtlichen Blickwinkeln betrachtet werden, wobei natürlich im Vergleich zu physischen Modellen Einschränkungen bezüglich haptisch-taktiler Erfahrungsmöglichkeiten bestehen.

3 Dreidimensionales Skizzieren

Die Entwicklung eines Werkzeugs zum dreidimensionalen Skizzieren und die damit gemachten Erfahrungen sind Inhalt dieses Kapitels. Zunächst werden mögliche Einsatzszenarien für ein 3D-Skizzierwerkzeug diskutiert und ein geeignetes Szenario ausgewählt. Im Anschluss wird die Entwicklung von zwei Generationen des „3D-Skizzierers“ beschrieben: zunächst eine Machbarkeitsstudie, um die technische Realisierbarkeit abzusichern, und anschließend ein weiterentwickelter Prototyp, der als Basis für Versuche diene. Die damit gemachten praktischen Erfahrungen sind Inhalt des darauf folgenden Teilkapitels, das Stärken und Schwächen des dreidimensionalen Skizzierens im Vergleich zu Papier und CAD aufzeigt und die Grenzen des realisierten Ansatzes dokumentiert. Abschließend wird eine Zusammenfassung der wesentlichen Inhalte dieses Kapitels gegeben und ein Fazit gezogen.

3.1 Einsatzszenarien

Die möglichen Einsatzfelder eines Werkzeugs zum dreidimensionalen Skizzieren sind sehr vielfältig. In diesem Teilkapitel werden verschiedene Einflussfaktoren vorgestellt und zu Szenarien kombiniert. Auf Basis einer Diskussion der Szenarien wird ein viel versprechendes Szenario ausgewählt, das als Grundlage für die Entwicklung des 3D-Skizzierwerkzeugs dient.

Zunächst soll die potenzielle Zielgruppe des 3D-Skizzierers betrachtet werden. Sehr viele verschiedene Disziplinen beschäftigen sich mit der Modellierung von Geometrien. Grob lassen sich diese Disziplinen in künstlerisch und ingenieurmäßig orientierte unterteilen. Bei den künstlerisch geprägten steht das ästhetische Aussehen, also die Form im Vordergrund, wohingegen bei den Ingenieursdisziplinen die Funktion im Vordergrund steht. Vergleicht man die Art und Weise, wie beispielsweise Industriedesigner im Gegensatz zu Konstrukteuren Papier-skizzen anfertigen, so sind signifikante Unterschiede festzustellen. Eine Konstrukteursskizze ähnelt vom Stil her einer technischen Zeichnung: es werden Ansichten und Schnitte dargestellt, Kanten durch Linien repräsentiert und wesentliche Maße angegeben. Designer dagegen verwenden in ihren Skizzen perspektivische Darstellungen, die oft bewusst verzerrt sind, um bestimmte Objektbereiche hervorzuheben. Sie setzen Linien nicht für die Repräsentation der realen Objektkanten ein, sondern auch zur künstlerischen Ausgestaltung, beispielsweise durch Licht- und Schatteneffekte oder dadurch, dass an Ecken Linien über den Schnittpunkt hinaus gezeichnet werden, auch wenn sie dort keine Geometrie repräsentieren. Ein weiterer Unterschied ist die starke Verwendung verschiedener Stifte bei den Designern, wohingegen Konstrukteure meist mit einem einzigen Stift zurecht kommen. Diese Unterschiede beim Anfertigen

gen von Papierskizzen spielen auch eine Rolle bei der Entwicklung eines dreidimensionalen Skizzierwerkzeugs.

Ein weiterer personenbezogener Einflussfaktor ist die Zahl der mit dem 3D-Skizzierer arbeitenden Personen. Hier muss zwischen zeichnenden und betrachtenden Personen unterschieden werden. Im einfachsten Fall arbeitet eine Person alleine am 3D-Skizzierwerkzeug und ist gleichzeitig Zeichner und Betrachter. Es ist aber auch denkbar, dass es mehrere Zeichner gibt, die entweder gleichzeitig oder abwechselnd an einer Skizze arbeiten. Weiterhin kann es möglich sein, über den oder die Zeichner hinaus weitere Personen die 3D-Skizzen betrachten zu lassen, beispielsweise wenn verschiedene Konzepte zur Abstimmung stehen. In solchen Fällen kann ein dreidimensionales Skizzierwerkzeug auch als reines Betrachtungswerkzeug verwendet werden, das heißt, die vorhandene Skizzierfunktion wird nicht genutzt.

Abhängig von der Anzahl der Betrachter sind die raumbezogenen Einflussgrößen. Die Größe des Arbeitsraumes ist entscheidend dafür, wie viele Personen gleichzeitig eine dreidimensionale Skizze betrachten können. Die Mobilität des Skizzierwerkzeuges ist ein weiterer Faktor, der auf dessen Gestaltung einen Einfluss hat. Vorstellbar sind mobile Arbeitsplätze, die – vergleichbar mit heutigen Notebooks – von einer Person transportiert und an fast allen Orten eingesetzt werden können. Neben einem fest installierten Arbeitsplatz, der nur mit erheblichem Aufwand umgezogen werden kann, ist auch eine eingeschränkt mobile Version denkbar, die z. B. für Präsentationen auf Messen eingesetzt werden kann.

Beim Arbeiten mit Skizzen können verschiedene Phasen unterschieden werden: Das Erstellen einer Skizze auf Basis kreativer Ideen, das Bearbeiten und Ergänzen bereits vorhandener Skizzen und Modelle sowie die Kommunikation mit anderen auf Basis fertiger oder halbfertiger Skizzen. Je nach dem, welche dieser Phasen ein Skizzierwerkzeug unterstützen soll, ändern sich auch die Anforderungen an dieses Werkzeug.

Die einzelnen Einflussfaktoren und deren Ausprägungen können übersichtlich in einem Morphologischen Kasten (siehe Abbildung 3-1) dargestellt werden. Aus der Vielzahl an möglichen Kombinationen lassen sich Szenarien ableiten, die eine verträgliche Kombination der Faktoren aufweisen.

Disziplinen	künstlerisch	ingenieurmäßig		
Zeichner	einer	mehrere		
Betrachter	einer	mehrere		
Größe des Arbeitsraums	Aktionsraum Hand	Aktionsraum Unterarm	Aktionsraum Arm	Begehbare Aktionsraum
Mobilität	Notebook	Messestand	Festinstallation	
Phasen	Erstellen	Erstellen, Bearbeiten und Ergänzen	Erstellen, Bearbeiten, Ergänzen und Kommunizieren	

Abbildung 3-1: Morphologischer Kasten in Anlehnung an REITER [2003]

Aus den zahlreichen konsistenten Kombinationen der Einflussfaktoren wurden drei vorausgewählt: „Mobiler 3D-Skizzierer“, „Erweiterter CAD-Arbeitsplatz“ und „Großer Präsentations- und Arbeitsraum“ [MÜLLER ET AL. 2003]. Diese drei sollen im Folgenden näher erläutert werden.

Allen drei Szenarien gemeinsam ist, dass sie für ingenieurmäßige Anwendungen gedacht sind. Auch wenn viele Anwendungen für künstlerische Disziplinen denkbar sind, erscheint es aufgrund des ingenieurwissenschaftlichen Hintergrunds dieser Arbeit sinnvoll, sich bei der Entwicklung eines Skizzierwerkzeugs zunächst primär auf Ingenieur Anwendungen zu konzentrieren.

Das Szenario „Mobiler 3D-Skizzierer“ zielt auf die Flexibilität des Einsatzes von Stift und Papier ab. Zu jeder Zeit und an jedem Ort soll es möglich sein, Gedanken in 3D festzuhalten. Ein derartiges Skizziersystem ist als Ersatz für einen Notizblock zum schnellen Festhalten von Ideen gedacht. Es muss nicht notwendigerweise in der Lage sein, bestehende CAD-Modelle laden zu können, um diese durch dreidimensionale Skizzen zu ergänzen. Analog zu einem Notizblock ist auch hier ein Arbeitsraum, der durch den Aktionsraum der Hand beschränkt wird, ausreichend.

Beim Szenario „Erweiterter CAD-Arbeitsplatz“ stand die Gestaltung konventioneller Konstruktionsarbeitsplätze Pate. Auch hier wird üblicherweise alleine gearbeitet. Für das Erreichen der Bedienelemente Tastatur und Maus ist der Aktionsraum des Unterarms ausreichend. Ein derartiger Arbeitsplatz ist zwar nicht so mobil wie ein Notebook, allerdings lässt er sich

mit vertretbarem Aufwand umziehen. All diese Eigenschaften soll ein für dieses Szenario entwickelter 3D-Skizzierer auch besitzen.

Für eine Präsentation von Arbeitsergebnissen ist ein CAD-Arbeitsplatz eher ungeeignet. Im Szenario „Großer Präsentations- und Arbeitsraum“ müssen virtuelle Modelle und 3D-Skizzen großflächig dargestellt werden um von allen Betrachtern vernünftig wahrgenommen zu werden. Möchte man in der vergrößerten Darstellung beispielsweise 3D-Skizzen ergänzen oder verändern, benötigt man einen Interaktionsraum, der dem Darstellungsraum entspricht und je nach dessen Größe mindestens den Aktionsraum des Armes umfasst.

Um in vertretbarer Zeit mit überschaubaren Kosten einen funktionsfähigen Prototypen zu entwickeln, wurde das Szenario „erweiterter CAD-Arbeitsplatz“ als Basis ausgewählt. Sowohl ein mobiler 3D-Skizzierer als auch ein großer Präsentations- und Arbeitsraum verlangen nach spezialisierter Hardware für die Ein- und Ausgabe, die entweder noch nicht verfügbar ist oder zu sehr hohen Preisen gehandelt wird. Dagegen war die für einen „erweiterten CAD-Arbeitsplatz“ benötigte Hardware bereits am Lehrstuhl für Produktentwicklung vorhanden. Das gewählte Szenario hat zudem das größte Potenzial für eine hohe Praxisverbreitung, da es auf einer vertrauten Arbeitsplatzgestaltung und etablierten Werkzeugen aufbaut.

3.2 Werkzeug zur Erzeugung dreidimensionaler Skizzen

In den folgenden Unterkapiteln werden zwei Generationen eines Werkzeugs zur Erzeugung dreidimensionaler Skizzen vorgestellt – eine Machbarkeitsstudie und ein daraus weiterentwickelter Prototyp. Grundlage für die Entwicklung bildete eine Vision eines zukünftigen 3D-Skizzierwerkzeugs [GAAG 2002], die aus Anwendersicht formuliert wurde:

„Ich möchte meine Ideen, die noch keine feste Gestalt oder Geometrie haben, die aber schon klar in meiner Vorstellung im Kopf sind, im Rechner festhalten und fixieren. Dazu möchte ich so einfach arbeiten wie mit Stift und Papier. Wichtig ist für mich beim Skizzieren mit Papier und Bleistift, dass ich schnell und intuitiv meine Ideen auf's Blatt bringen kann ohne über die Bedienung der Werkzeuge nachdenken zu müssen. Ich will nicht konstruieren, sondern in erster Linie zeichnen und kreativ tätig sein. Der Einsatz des Systems soll nicht auf Geometrie beschränkt sein, sondern auch die Darstellung von Funktionen und abstrakten Ideen ohne Geometrie ermöglichen. Optimalerweise baut mein CAD-System dann auf diesen Skizzen auf und nutzt die generierten Informationen weiter.“

3.2.1 Allgemeines

Beiden Generationen ist gemeinsam, dass sie auf Basis von vorhandenen Komponenten aufgebaut worden sind. Machbarkeitsstudie und Prototyp ermöglichen die Anfertigung dreidimensionaler Freihandskizzen im Raum. Analog zum Skizzieren auf Papier werden ausschließlich Linien erzeugt. Diese Linien werden intern als „Voxelwolke“ gespeichert, was in Analogie zu einem 2D-Skizziertablett einer Bitmap-Grafik entspricht. Damit wird bewusst von flächen- oder volumenbasierten Modellen Abstand genommen, um die spezifischen Eigenschaften der Papierskizze auch in 3D zu bewahren. Die Freihandlinie als basales Gestaltungselement lässt dem Entwickler alle darstellerischen Freiheiten um auch abstrakte, unscharfe und unvollständige Informationen zu fixieren.

Ein 3D-Skizzierer macht nur Sinn, wenn die Skizze intuitiv im Raum erzeugt werden kann (3D-Eingabe) und auch wirklich im Raum dargestellt werden kann (3D-Ausgabe). Um dieses Ziel zu erreichen wurde für die Eingabe der Skizzen und die bildliche Ausgabe auf Virtual-Reality-Technologien zurückgegriffen. Diese bieten Möglichkeiten, einerseits die Position von Eingaberäten im Raum zu ermitteln und andererseits mittels Stereovisualisierung digitale 3D-Modelle räumlich darzustellen. Sowohl für die Eingabe als auch für die Ausgabe bieten sich verschiedene Ausprägungen dieser Technologien an. Prinzipiell wird ein Eingabewerkzeug (beispielsweise ein Stift) im Raum bewegt. Sobald der Eingabemodus aktiviert wird, entsteht entsprechend der Bewegung des Eingabewerkzeugs eine Freihandkurve im Raum. Neben stiftartigen Eingabegeräten mit oder ohne Force-Feedback-Möglichkeit wäre es auch denkbar, die Gestik des Benutzers anhand eines Datenhandschuhs zu erfassen und so seine Fingerspitze zum 3D-Stift zu machen. Allen Verfahren gemeinsam ist, dass die Position der „Stiftspitze“ im Raum getrackt werden muss. Auch für die Ausgabe gibt es eine große Bandbreite von Möglichkeiten: neben Datenhelmen, einfachen Desktop-VR-Arbeitsplätzen und Projektionstischen ist natürlich auch der Einsatz eines 3D-Skizzierers in einer CAVE denkbar.

Für die realisierten 3D-Skizzierer wurde sowohl für die Eingabe als auch für die Ausgabe auf Desktop-VR-Geräte gesetzt, um mit günstigen Komponenten die prinzipielle Realisierbarkeit eines 3D-Skizzierwerkzeugs zu demonstrieren. Auf diese Weise wäre ein 3D-Skizzierwerkzeug auch in die übliche Arbeitsumgebung eines Entwicklers integrierbar. Basis von Machbarkeitsstudie und Prototyp ist eine hochwertige Grafikkonsole auf PC-Basis mit einem 21-Zoll Röhrenmonitor. Die Stereo-Darstellung wird mit Hilfe eines Infrarot-Emitters und Shutterbrillen realisiert (aktives Stereo). Als Eingabegerät kommt das kraftreflektierende 6D-Eingabegerät PHANTOM® Desktop™ der Firma SensAble™ zum Einsatz.

Softwarebasis für die realisierten 3D-Skizzierer ist der WorldToolKit® der Firma Sense8®. Diese Software wird unter dem Betriebssystem Microsoft® Windows NT® 4.0 genutzt. In Verbindung mit dem GHOST® SDK (im Lieferumfang des PHANTOM® Desktop™ enthalten) konnten die im Folgenden beschriebenen 3D-Skizziererwerkzeuge implementiert werden.

3.2.2 Machbarkeitsstudie

Ziel bei der Entwicklung dieser ersten Implementierung eines 3D-Skizzierwerkzeugs war, die prinzipielle Machbarkeit unter Beweis zu stellen. Mit dieser Machbarkeitsstudie sollten erste Erfahrungen im Umgang mit 3D-Skizzen gesammelt werden um eine Basis für weiterführende Optimierungsmaßnahmen zu erhalten. Bewusst wurde hier eine möglichst schnelle Realisierung angestrebt um zeitnah mit der Informationsgewinnung beginnen zu können.

Von der Hardwareseite ähnelt der Aufbau stark einem normalen CAD-Arbeitsplatz und stellt damit eine klassische Desktop-VR Anwendung dar. Neben den üblichen Hardwarekomponenten Rechner, Röhrenmonitor, Tastatur, Maus und SpaceMouse® ist dieser Arbeitsplatz zusätzlich mit einem Infrarot-Emitter zur Ansteuerung der Shutterbrillen sowie mit dem 6D-Eingabegerät PHANTOM® Desktop™ ausgestattet. Dieses Eingabegerät steht rechts neben der Tastatur, dort, wo sich üblicherweise (bei Rechtshändern) die Maus befindet. Damit geschieht die Eingabe außerhalb des Darstellungsraums. Abbildung 3-2 zeigt die Anordnung der Komponenten.

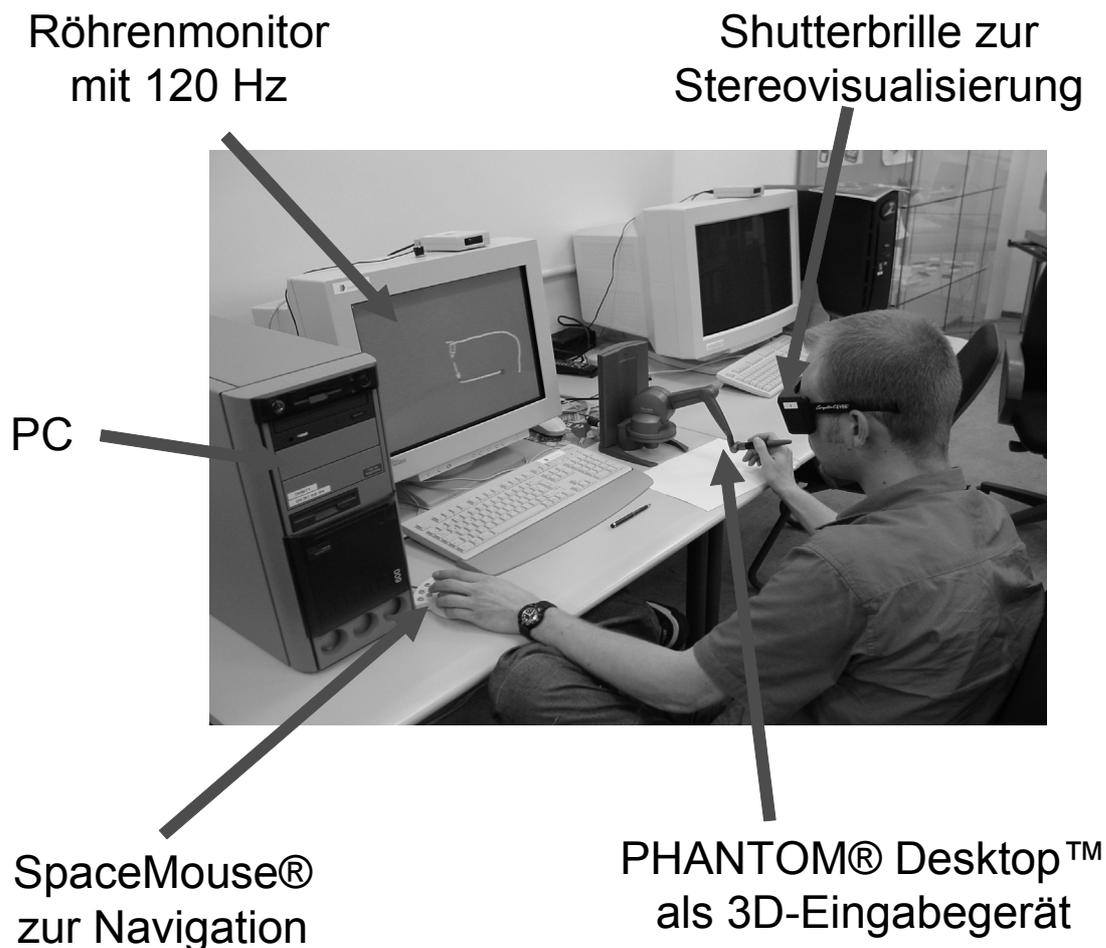


Abbildung 3-2: Machbarkeitsstudie des 3D-Skizzierwerkzeugs

Die für diesen Aufbau entwickelte Software liest die x-, y- und z-Koordinaten des Eingabegeräts ein und stellt die Verbindungen zwischen den eingelesenen Koordinaten (den Voxeln der 3D-Skizze) in Form von kleinen Zylindern dar. Dadurch können auch bei schnellen Zeichenbewegungen glatte Linien ohne Lücken erzeugt werden. Der Funktionsumfang der Machbarkeitsstudie ermöglicht das freie Skizzieren im Raum sowie das freie Drehen und Verschieben der dreidimensionalen Skizze. Als Orientierungshilfe wird in den virtuellen Raum eine Grundfläche eingeblendet, die der Tischfläche entspricht. Liegt die „Stiftspitze“ des PHANTOM® Desktop™ auf dem Tisch auf, berührt der „3D-Mauszeiger“ gerade die virtuelle Grundfläche. Diese Konfiguration ermöglicht bei Bedarf die Arbeit in einer festen Ebene, indem quasi auf dem Tisch skizziert wird. Die so erzeugten Skizzen können danach beliebig im Raum angeordnet werden. Abbildung 3-3 zeigt die 3D-Skizze des Konzeptes für einen Laserschweißroboter, der zum Fügen räumlich gekrümmter Bleche verwendet wird.

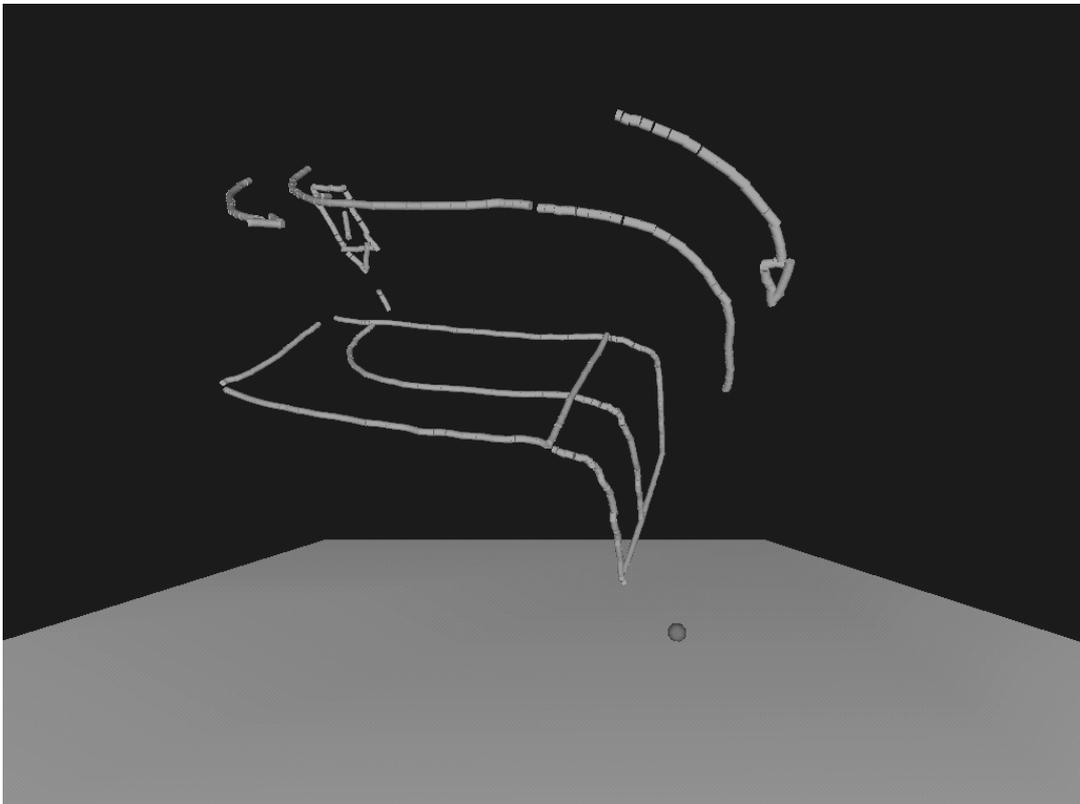


Abbildung 3-3: 3D-Skizze einer Laserkopfführung, erstellt mit der Machbarkeitsstudie

Auf der Eingabeseite wurde ein Bedienkonzept verwirklicht, das die Benutzung von zwei Eingabewerkzeugen vorsieht. Zur Eingabe der Skizze im Raum wird das PHANTOM® Desktop™ verwendet (Abbildung 3-4). Dieses Gerät verfügt über einen stiftähnlichen Griff mit einem Taster, der in gedrücktem Zustand die Darstellung von Linien im Raum bewirkt. Ist der Taster nicht gedrückt, wird analog zum Mauszeiger in 2D eine Kugel im Raum dargestellt,

deren räumliche Tiefe dank der Stereo-Darstellung wahrgenommen werden kann. In Analogie zum Arbeiten mit Bleistift und Papier, bei dem mit einer Hand skizziert und mit der anderen Hand das Papier auf der Arbeitsfläche nach Bedarf gedreht und verschoben wird, gibt es ein eigenes Eingabegerät für das Bewegen der dreidimensionalen Skizze im Raum. Hierzu wird mit der SpaceMouse® ein intuitiv zu bedienendes Werkzeug eingesetzt, das im 3D-CAD-Bereich wohlbekannt ist. Die Trennung von Eingabe- und Navigationswerkzeug macht eine Funktion zum Umschalten überflüssig und ermöglicht somit ein einfacheres Arbeiten mit dem 3D-Skizzierer.



Abbildung 3-4: Eingabegerät PHANTOM® Desktop™ der Firma SensAble™

Diese Machbarkeitsstudie wurde auf der Hannover Messe 2002 auf dem Gemeinschaftsstand des Berliner Kreises¹⁷ dem interessierten Fachpublikum vorgestellt. Über 100 Besucher testeten das 3D-Skizzierwerkzeug und wurden dabei gezielt beobachtet. Aus der Analyse der dort gemachten Beobachtungen ergab sich eine Reihe von Faktoren, die in unterschiedlicher Ausprägung einen Einfluss auf die Qualität der Skizzen und auf die Zufriedenheit des Benutzers haben. Als viel versprechend für die weitere Entwicklung erschienen:

¹⁷ Der Berliner Kreis - Wissenschaftliches Forum für Produktentwicklung e.V. ist ein Zusammenschluss von 25 Universitätsprofessoren aus dem deutschsprachigen Raum.

- Umsetzung der noch nicht realisierten Anforderung nach Übereinstimmung von Handlungs- und Wahrnehmungsraum
- Treffen des Endpunktes einer bereits bestehenden Linie
- Dämpfung der Bewegung im Raum (in Analogie zur Reibung des Stifts auf dem Papier)
- Größe des Arbeitsraums

Auffällig bei der Beobachtung von Personen, die zum ersten Mal den 3D-Skizzierer der ersten Generation benutzen, war, dass die angefertigten Skizzen – nach einem Drehvorgang aus einer anderen Perspektive betrachtet – oft nicht wie erwartet aussahen. Manche Personen versuchten nach dieser Erfahrung erneut eine 3D-Skizze anzufertigen, allerdings richteten sie dabei ihren Blick nicht auf den Monitor, sondern auf das Eingabegerät und die skizzierende Hand. Bei diesem Vorgehen muss der Benutzer sich seine dreidimensionale Skizze jedoch im Geiste vorstellen, was nicht der gewünschten Unterstützung durch den 3D-Skizzierer entspricht. Allerdings war die Qualität der so erzeugten 3D-Skizzen höher, denn sie entsprachen auch nach dem Drehen besser den Vorstellungen der skizzierenden Person. Von der Zusammenführung von Wahrnehmungs- und Handlungsraum wird daher eine deutliche Verbesserung der Arbeitsqualität und Zufriedenheit beim Skizzieren erwartet. Gleiches gilt für die Implementierung einer Dämpfungsfunktion für das Eingabegerät, da dies eher den natürlichen Erfahrungen im Umgang mit Stift und Papier entspricht.

Ein Problem, das beim zweidimensionalen Skizzieren kaum Aufmerksamkeit findet, ist das Treffen von Endpunkten bereits skizzierter Linien. In 2D ist man üblicherweise im Umgang mit dem Zeichengerät motorisch so gewandt, dass man die Punkte, die man im Geist anvisiert, auch in der Realität trifft. Mit dem ersten Prototyp des 3D-Skizzierers war es jedoch schwierig, Punkte im Dreidimensionalen exakt mit dem Cursor zu treffen. Da es kein natürliches Analogon zum 3D-Skizzierer gibt, sind die Wahrnehmung und die Motorik dafür nicht ausreichend trainiert. Verbesserungen bei der Treffsicherheit sind durch die Zusammenführung von Handlungs- und Wahrnehmungsraum sowie durch optische und haptische Snap-Funktionen¹⁸ denkbar.

Die Funktionalität des ersten Prototyps beschränkte sich auf das Erzeugen und Darstellen einfarbiger dreidimensionaler Skizzen mit konstanter Strichstärke sowie das freie Verschieben und Rotieren der Skizzen im Raum. Für erste Untersuchungen erschien dieser Funktionsumfang ausreichend. Um jedoch produktiv mit dem Werkzeug arbeiten zu können, sind weitere Funktionen wie z. B. Löschen und Speichern sowie Änderung von Strichstärke und -farbe notwendig.

¹⁸ Snap-Funktionen werden auch als Fangfunktionen bezeichnet

3.2.3 Prototyp

Auf Basis der Machbarkeitsstudie wurde ein Prototyp des 3D-Skizzierwerkzeugs mit erweitertem Funktionsumfang entwickelt, dabei wurden die bisher gewonnenen Erkenntnisse sowie die erkannten Schwächen berücksichtigt. Da die räumliche Trennung von Ein- und Ausgabe für viele Benutzer irritierend war und auch das zielgenaue Anfahren eines Linienendpunktes eine hohe Konzentration erforderte, wurde bei der Überarbeitung des Hardwareaufbaus das Hauptaugenmerk auf die Verschmelzung von Handlungs- und Wahrnehmungsraum gelegt. Im Gegensatz zu herkömmlichen CAD-Systemen sollte hier Ein- und Ausgabe dreidimensional und räumlich integriert erfolgen. Diese Integration erfordert eine Erweiterung der Softwarefunktionalität um eine Kalibrierungsmöglichkeit. Darüber hinaus sollte die Weiterentwicklung der Software die in Kapitel 3.2.2 angesprochenen Schwachpunkte beseitigen.

Bei der Machbarkeitsstudie des 3D-Skizzierers wurden die dreidimensionalen Skizzen so dargestellt, dass Teile der Skizze vor dem Monitor und weiter hinten liegende Teile der Skizze im Monitor wahrgenommen wurden. Damit war der im Monitor liegende Teil des Wahrnehmungsraums als Arbeitsraum nicht verwendbar. Um diese Problematik zu lösen, wurden drei Konzepte entwickelt [SCHNEIDER & JUNG 2003]:

- vollständige Darstellung der 3D-Skizze **vor** dem Monitor und Einsatz eines Eingabegeräts, das die Sicht auf die Skizze nicht einschränkt
- Einsatz eines flachen Bildschirms und vollständige Darstellung der 3D-Skizze **hinter** dem Bildschirm
- Keine Änderung der Darstellung auf dem Röhrenmonitor. Betrachtung des Monitorbildes über einen semitransparenten Spiegel. Arbeitsraum unterhalb des semitransparenten Spiegels

Problematisch beim ersten Konzept waren Schwierigkeiten bei der scharfen Darstellung der sich nahe am Auge befindlichen Teile der Skizze sowie die Notwendigkeit einer Neukonstruktion des Eingabegeräts. Daher wurde dieses Konzept nicht weiterverfolgt. Für das zweite Konzept wäre ein TFT- oder Plasma-Flachbildschirm erforderlich gewesen. Die für aktives Stereo notwendigen Bildwiederholfrequenzen von mindestens 120 Hz können jedoch von handelsüblichen Flachbildschirmen nicht verarbeitet werden. Existierende Ansätze, autostereoskopische Darstellung mit TFT-Monitoren zu realisieren, z. B. mit vor das Display montierten Prismenoptiken, liegen in der Bildqualität weit hinter aktivem Stereo mit Röhrenmonitor. Aus diesem Grund wurde auch das zweite Konzept verworfen. Das dritte Konzept kommt ohne Änderungen an Ein- und Ausgabe aus, lediglich die Anordnung der Komponenten muss geändert und der semitransparente Spiegel ergänzt werden. Aus diesem Grund wurde Konzept drei als Basis für den Prototypen des 3D-Skizzierers ausgewählt. Dieses Konzept kommt auch beim Reachin®-Display der Firma Reachin® Technologies zum Tragen.

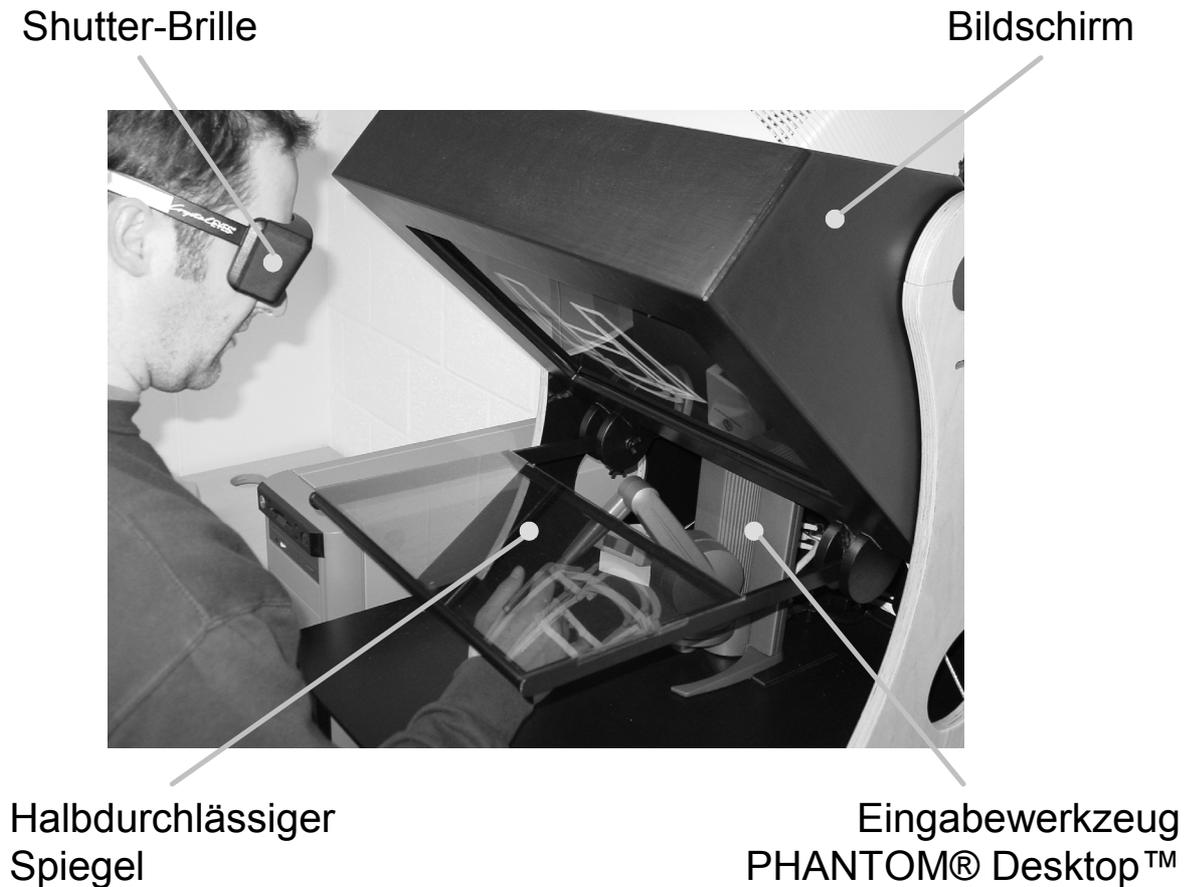


Abbildung 3-6: Realisierung des Prototyps

Die Funktionalität der Software des Prototyps wurde im Vergleich zur Machbarkeitsstudie deutlich erweitert. Die Eigenschaften der Linien lassen sich hinsichtlich Strichstärke und Farbe in einem Menü verändern. Dies ermöglicht z. B. die Farbcodierung der einzelnen Bauteile innerhalb einer Baugruppe. Weitere hinzugekommene Funktionen sind Speichern und Laden von 3D-Skizzen, Laden von aus CAD-Modellen abgeleiteten VRML¹⁹-Dateien, und Einblenden eines Raumgitters. Mittels der Force-Feedback-Funktionalität des PHANTOM® Desktop™ ist es möglich, einen Reibeffekt bei der Bewegung des Eingabestifts durch den Raum zu erzeugen um damit die Kräfte zwischen Stift und Papier zu simulieren.

In Abbildung 3-7 wird eine Skizze eines Messestands dargestellt, die mit der zweiten Generation des 3D-Skizzierers – dem Prototypen – erstellt wurde. Deutlich zu erkennen ist, dass die 3D-Linien nicht nur der Repräsentation von Kanten dienen, sondern auch für die Schraffur von Flächen und für Beschriftungen verwendet werden.

¹⁹ Virtual Reality Modeling Language

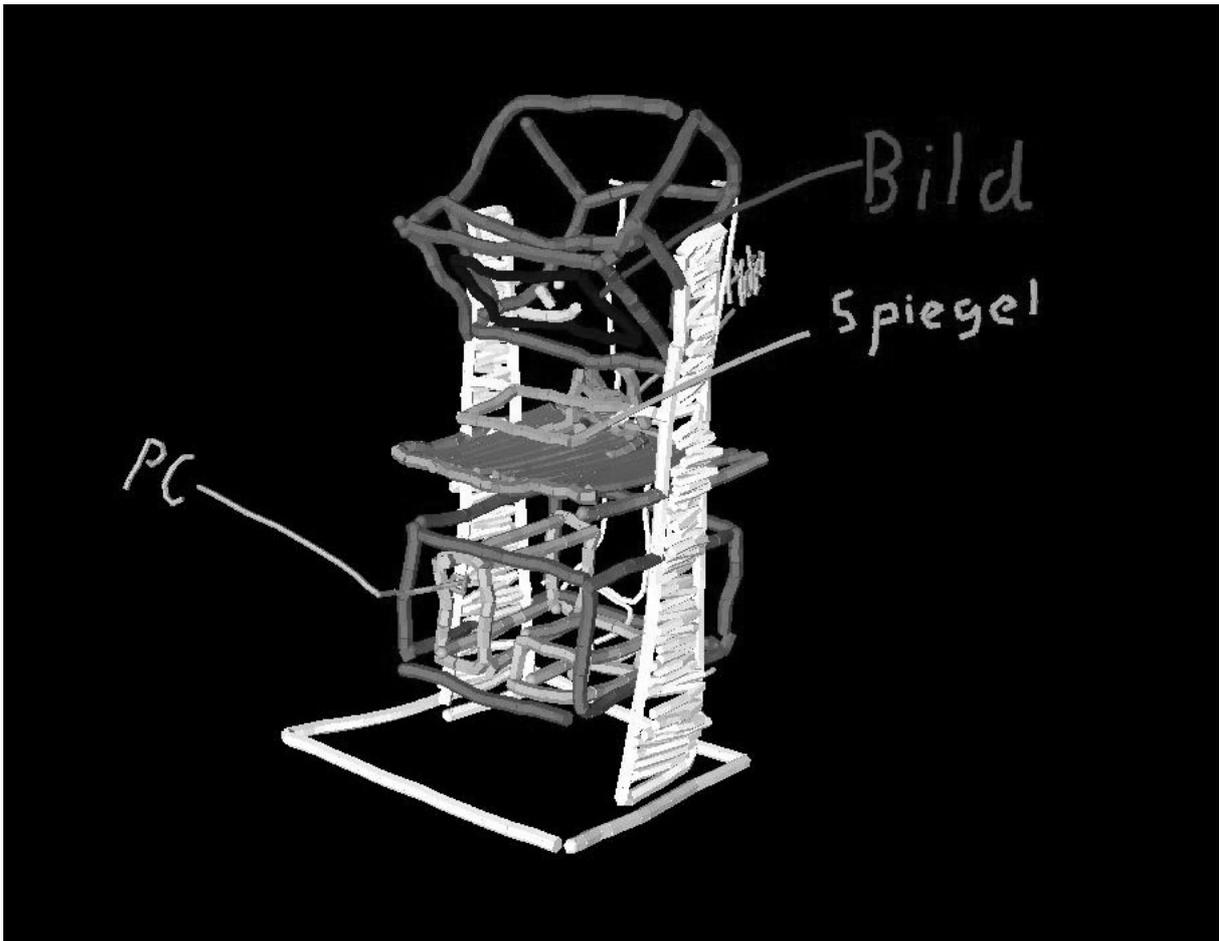


Abbildung 3-7: 3D-Skizze des Messestands zur Präsentation des Prototyps

3.3 Praktische Erfahrungen

Die im vorigen Teilkapitel beschriebene Version des 3D-Skizzierwerkzeugs bot hinsichtlich Darstellungsqualität, Bedienbarkeit und Funktionsumfang eine ausreichende Reife um als Basis für erste Untersuchungen zum dreidimensionalen Skizzieren zu dienen. Diese Untersuchungen wurden in Form von Fallstudien durchgeführt, da mit diesem Ansatz in kurzer Zeit wesentliche Erkenntnisse gewonnen werden können, die der Weiterentwicklung des 3D-Skizzierers dienen. Großangelegte Versuche einschließlich statistischer Auswertung wurden bei dem betrachteten prototypischen Entwicklungsstand als noch nicht zielführend erachtet.

Ziel dieser Untersuchungen war, die Hypothese dieser Arbeit, dass digitale Werkzeuge zur Modellierung unscharfer Geometrieinformationen in frühen Phasen Vorteile gegenüber herkömmlichen Papierskizzen haben und einen Beitrag zur Optimierung von Produktentwicklungsprozessen leisten, zu verifizieren. Darüber hinaus sollten vorhandene Schwachstellen des

prototypischen 3D-Skizzierwerkzeugs identifiziert werden um als Ausgangspunkt für die Entwicklung zukünftiger Generationen zu dienen.

Grundlage für die Fallstudien war eine Versuchsreihe mit Studenten der Fakultät für Maschinenwesen. An dieser Versuchsreihe nahmen zehn Studenten (neun männliche Versuchspersonen und eine weibliche Versuchsperson) aus unterschiedlichen Semestern (1x 3. Semester, 8x 5. Semester, 1x 9. Semester) teil [KAIN 2004, SCHWENTNER 2004]. Die Probanden bekamen zwei unterschiedliche Aufgaben gestellt. Die erste Aufgabe bestand darin, einen Schlitten zu skizzieren. Die zweite Aufgabe hatte das Skizzieren eines Cocktails bestehend aus Glas, Inhalt und Dekoration zum Inhalt. Die Versuchspersonen mussten eine der beiden Aufgaben mit Stift und Papier bearbeiten und die andere Aufgabe mit dem 3D-Skizzierer lösen. Die Probanden wurden in zwei gleich große Gruppen aufgeteilt, die die Aufgaben in unterschiedlicher Reihenfolge bearbeiteten. Damit wurde sichergestellt, dass jede Aufgabe zu gleichen Teilen mit beiden Werkzeugen bearbeitet wurde.

Die Versuchsdurchführung begann mit einer kurzen Einführung in den 3D-Skizzierer. Anschließend wurden die Versuchspersonen gebeten, die schriftlich formulierten Aufgaben zu bearbeiten. Nach Abschluss der Bearbeitung wurden mittels eines Fragebogens die gemachten Erfahrungen und subjektiven Bewertungen erfasst. Die gesamte Bearbeitungszeit wurde auf Video dokumentiert, um anschließend detaillierte Analysen durchführen zu können. Die Auswertung der Videodaten erfolgte mit der Software „Ergoplayer“²⁰.

Neben den durchgeführten Fallstudien boten öffentliche Demonstrationen des 3D-Skizzierers auf der Hannover Messe 2003 sowie auf den Konferenzen „Human Behaviour in Design 2003“ und „Mensch und Computer 2003“ gute Gelegenheiten, Personen bei der Arbeit mit dem 3D-Skizzierer zu beobachten und dabei die Ergebnisse aus den Fallstudien zu verifizieren.

Im Folgenden werden die Ergebnisse aus den Versuchen und Beobachtungen beschrieben. Neben einer allgemeinen Analyse der ermittelten Stärken und Schwächen wird detailliert auf die Aspekte Grenzen des linienbasierten Ansatzes, Größe des Arbeitsraums und Head Tracking eingegangen.

3.3.1 Stärken und Schwächen im Vergleich zu Papier und CAD

Da Werkzeuge zum Anfertigen dreidimensionaler Skizzen bislang nicht verfügbar waren, gab es folglich auch keine Erfahrungen im Umgang mit einem derartigen Werkzeug. Aufgrund der durchgeführten Versuche und Beobachtungen können nun grundlegende Aussagen über

²⁰ Die Software „Ergoplayer“ ist eine Eigenentwicklung des Lehrstuhls für Ergonomie der Technischen Universität München und wurde dankenswerterweise für die Auswertung der Videodaten zur Verfügung gestellt.

das Arbeiten mit dreidimensionalen Skizzen gemacht werden. Damit kann zum einen überprüft werden, wie weit es gelungen ist, die Vorteile von Papierskizze und 3D-CAD zu kombinieren. Zum anderen sollen die ermittelten Stärken und Schwächen Anregungen für die Entwicklung zukünftiger CAD-Systeme liefern.

Bei Benutzertests mit einem innovativen Werkzeug stellt sich die Frage, wie das Werkzeug von den Benutzern aufgenommen wird. Werden die vermuteten Vorteile des neuen Systems überhaupt wahrgenommen? Welche Vorteile erkennen die Benutzer im Vergleich zu herkömmlichen Systemen? Welche Kritikpunkte werden geäußert? Gerade Erstbenutzer sind sehr sensibel gegenüber Mängeln, weil sie sich noch nicht mit eventuellen Unzulänglichkeiten abgefunden haben und somit unvoreingenommen Kritik üben können. Die im Folgenden erläuterten Vor- und Nachteile des untersuchten Systems im Vergleich zu Papier und CAD basieren auf systematischen Befragungen von Personen, die im Rahmen der durchgeführten Experimente mit dem 3D-Skizzierer arbeiteten²¹.

In der Versuchsreihe wurden zwei Aufgaben gestellt, die sowohl mit Stift und Papier als auch mit dem 3D-Skizzierer bearbeitet wurden. Betrachtet man die Zeitanteile der verschiedenen Tätigkeiten, die die Versuchspersonen während der Bearbeitung ihrer Aufgabe durchführten, ist auffällig, dass die nur beim 3D-Skizzierer möglichen Tätigkeiten Rotation und Zoom die Hälfte der Bearbeitungszeit darstellten (siehe Abbildung 3-8).

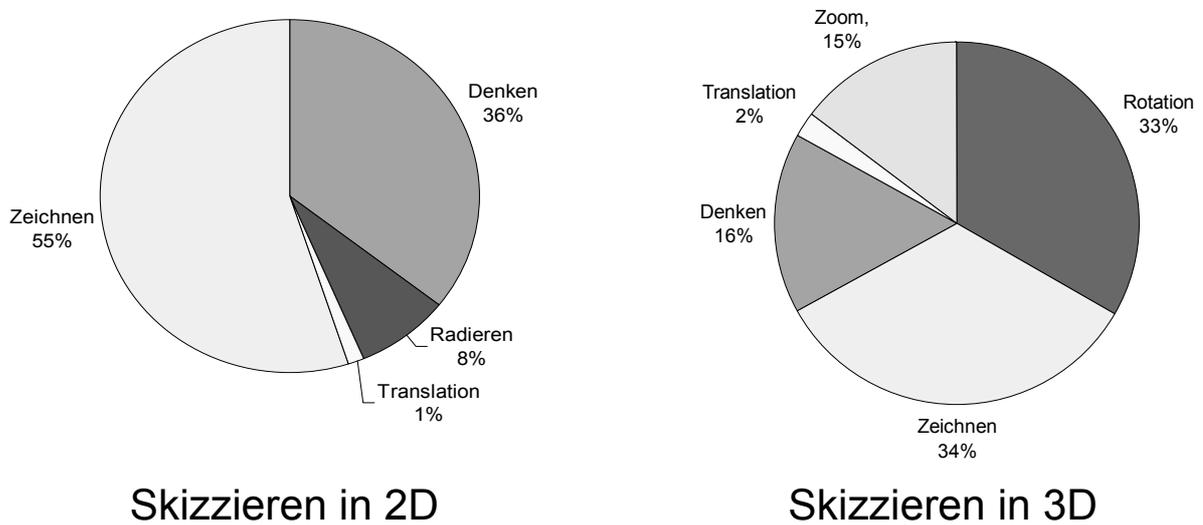


Abbildung 3-8: Anteile der Tätigkeiten beim Skizzieren in 2D und 3D

²¹ Die Abfrage der Vor- und Nachteile erfolgte über separate Freitextfelder, wodurch pro Versuchsperson auch mehrere Nennungen möglich waren. Ähnliche Äußerungen wurden in der Auswertung zusammengefasst. Der Fragebogen ist im Anhang zu finden.

Vor allem die intensive Benutzung der Rotation legt die Vermutung nahe, dass diese Funktion eine Stärke des 3D-Skizzierers darstellt, auch wenn die Bearbeitungszeit mit dem 3D-Skizzierer deutlich²² über der für die 2D-Skizze lag. Diese Vermutung wird durch die von den befragten Personen genannten Stärken des 3D-Skizzierens bestätigt.

Genannte Stärken des Skizzierens in 3D:

- Direktes Skizzieren in 3D, dadurch keine Notwendigkeit, in Schnitte oder perspektivische Darstellungen umcodieren zu müssen (6 Nennungen)
- Möglichkeit, die Skizze im Raum zu drehen, dadurch keine Notwendigkeit des Skizzierens weiterer „Ansichten“ (4 Nennungen)
- Schnelleres Verständnis komplexer dreidimensionaler Objekte (3 Nennungen)
- Intuitive Bedienung (3 Nennungen)

Durch das direkte Skizzieren in 3D muss im Gegensatz zum Transfer von Ideen auf das Papier bzw. in das CAD-System nicht erst die gedankliche Leistung vollbracht werden, die dreidimensionale Vorstellung in Schnitte oder perspektivische Darstellungen zu transferieren. Gerade angesichts der Tatsache, dass das Anfertigen perspektivischer Skizzen bei Ingenieuren in der Ausbildung – im Vergleich zu Industriedesignern – kaum behandelt wird, ist dies ein nicht zu unterschätzender Vorteil.

Aufgrund der Möglichkeit, die Skizze frei im Raum drehen zu können, erübrigt sich im Vergleich zu Papier die Notwendigkeit, mehrere Ansichten skizzieren zu müssen, um ein dreidimensionales Objekt vollständig zu beschreiben. Das freie Drehen hat auch den Vorteil, dass man Skizzen aus einer günstigeren Ansicht weiterbearbeiten kann. Bei komplexeren dreidimensionalen Objekten ermöglichte der 3D-Skizzierer, die räumlichen Zusammenhänge schneller zu verstehen. Gerade die Möglichkeit des freien Drehens und damit die Ansicht aus unterschiedlichen Perspektiven unterstützt das räumliche Verständnis.

Die Bedienung des 3D-Skizzierers wird im Vergleich zu CAD-Systemen als intuitiver angesehen, auch wenn die Intuitivität des Skizzierens auf Papier nicht erreicht wird. Dadurch, dass sich der Benutzer nicht mit der Bedienung des Systems beschäftigen muss, kann er seine Gedanken schneller festhalten und hat mehr Kapazität für das kreative Denken.

Die beobachteten Personen wurden bei der Befragung auch nach Schwächen des aktuellen Aufbaus befragt. Die genannten Nachteile des derzeitigen Systems können in implementierungsbedingt und aufbaubedingt unterschieden werden. Mit implementierungsbedingt sind fehlende Softwarekomponenten gemeint, die sich ohne Änderung des Hardwareaufbaus in

²² Der durchschnittliche Mehraufwand lag bei der Aufgabe „Schlitten“ bei 60%, bei der Aufgabe „Cocktail“ sogar bei 120%. Hierbei muss jedoch auch berücksichtigt werden, dass die Versuchspersonen keinerlei Erfahrung mit dem System 3D-Skizzierer hatten. Zur Aufgabe „Cocktail“ siehe auch Kapitel 3.3.2.

zukünftigen Versionen realisieren lassen könnten, wohingegen aufbaubedingt in diesem Zusammenhang für die prinzipielle Auswahl und Anordnung der Hardwarekomponenten steht.

Im Einzelnen wurden an implementierungsbedingten Nachteilen genannt:

- Fehlen von Hilfsebenen (3 Nennungen)
- kein Verschieben und Gruppieren von Teilbereichen einer Skizze (2 Nennungen)
- keine automatische Erzeugung gerader Linien, Flächen und Grundkörper (3 Nennungen)
- Fehlen von Komfortfunktionen wie z. B. Kopieren, Spiegeln, Drehen um definierte Winkel (2 Nennungen)
- keine permanente Darstellung des Menüs (2 Nennungen)
- keine Funktion zum Füllen von Objekten (2 Nennungen)

Der in den Versuchen eingesetzte prototypische 3D-Skizzierer bietet keine Möglichkeit, Hilfsebenen einzusetzen. Insbesondere für Beschriftungen und ebene Teilbereiche einer 3D-Skizze lassen beliebig im Raum anzuordnende Hilfsebenen eine Verbesserung in der Skizzierqualität erwarten. Die so erzeugten 2D-Skizzen können dann im Raum zu einer 3D-Skizze zusammengesetzt werden. Dazu ist es notwendig, Teile einer Skizze unabhängig vom Rest verschieben und rotieren zu können. Diese Funktionalität ist in der hier beschriebenen Version noch nicht realisiert, ebenso wenig wie die Möglichkeit, mehrere Teilobjekte zu gruppieren.

Im Vergleich zu professionellen Programmen aus den Bereichen Grafik, Präsentation und CAD besitzt der 3D-Skizzierer noch keine Funktionalität zur automatischen Erzeugung von geraden Linien sowie zwei- und dreidimensionaler geometrischer Grundkörper. Das Fehlen derartiger Möglichkeiten wurde als Schwäche der in den Versuchen eingesetzten Implementierung genannt. Dies gilt auch für fehlende Komfortfunktionen, wie sie von herkömmlicher Geometriemodellierungssoftware bekannt sind. Konkret wurden Funktionen wie Kopieren und Spiegeln gefordert. Daneben wurde die Anregung gegeben, die Rotation einzelner Objekte optional auf definierte Winkel (z. B. 30 °, 45 °, 60 °, 90 °) einzuschränken und dadurch zu präzisieren.

Weitere von Versuchspersonen genannte Anregungen zur Verbesserung der Implementierung sind eine permanente Darstellung der Bedienelemente statt eines separaten Menümodus sowie eine Funktion zum automatischen Füllen von skizzierten Objekten um nicht Flächen und Volumina aufwendig mit 3D-Linien füllen zu müssen.

Änderungen am Hardwareaufbau des 3D-Skizzierwerkzeugs sind aufwändiger zu realisieren als Softwareänderungen. Dennoch können die von den Benutzern geäußerten Schwächen An-

regungen für Änderungen oder neue Konzepte liefern. Folgende aufbaubedingten Nachteile wurden von den Benutzern geäußert:

- sehr kleiner Arbeitsraum (3 Nennungen)
- ungeeignet für detaillierte Skizzen (1 Nennung)
- anstrengende Stereo-Visualisierung, speziell bei längerer Arbeit (1 Nennung)

Ein wesentliches Manko des realisierten 3D-Skizzierers ist der eingeschränkte Arbeitsraum. Effektiv nutzbar ist ein Quader von ungefähr 15 cm Kantenlänge. Im Vergleich zur Fläche eines A4-Blattes (623,7 cm²) ist die Grundfläche des „Arbeitsquaders“ (ca. 225 cm²) sehr klein. Im Folgenden wird noch näher auf diese Problematik eingegangen. Bedingt durch den kleinen Arbeitsraum sowie die im Vergleich zu Papier geringere Auflösung des 3D-Skizzierers ist es kaum möglich, detaillierte Skizzen anzufertigen.

Das verwendete Verfahren zur Stereo-Darstellung mittels Shutter-Brillen erreicht im Vergleich zu anderen Verfahren eine sehr hohe Darstellungsqualität, dennoch kann das Arbeiten an derartigen Virtual-Reality-Arbeitsplätzen auf längere Zeit als anstrengend und ermüdend empfunden werden.

Durch Beobachtungen der Versuchsbetreuer sowie durch die Auswertung der Videoaufnahmen der Versuche wurden weitere Schwächen identifiziert, die von den Versuchspersonen im Fragebogen nicht explizit genannt wurden:

- Fehlen einer „Rückgängig“-Funktion
- keine Einbeziehung der Kopfposition in die Berechnung der Darstellung
- Schwierigkeiten beim linienbasierten Skizzieren von Körpern mit gekrümmten Oberflächen

Während der Arbeit mit dem 3D-Skizzierer äußerten Versuchsteilnehmer den Wunsch, bereits durchgeführte Aktionen wieder rückgängig machen zu können. Eine „Rückgängig“-Funktion würde im Vergleich zum gezielten Löschen ungewünschter Objekte die Bedienung des 3D-Skizzierers erheblich verbessern.

Es konnte wiederholt beobachtet werden, dass Versuchspersonen durch Einnehmen einer anderen Kopfposition versuchten, die 3D-Skizze aus einer anderen Perspektive zu betrachten. Bei der Betrachtung eines realen Objektes kann so beispielsweise eine Seitenfläche, die bei frontaler Draufsicht nicht zu erkennen ist, gesehen werden. Beim 3D-Skizzierwerkzeug ist jedoch die Darstellung der dreidimensionalen Skizze unabhängig von der Kopfposition des Benutzers und ändert sich somit bei verändertem Blickwinkel – anders als bei realen Objekten – nicht. Dies ist für den Benutzer verwirrend.

Ein weiterer Punkt, auf den noch ausführlicher eingegangen wird, ist die Problematik, gekrümmte Oberflächen im Raum durch Linien darzustellen. Während Körper mit ebenen Flächen wie z. B. Würfel, Quader oder Tetraeder durch das Skizzieren der Kanten leicht dargestellt werden können, muss bei Körpern mit gekrümmten Oberflächen wie z. B. Zylinder, Kegel oder Kugel eine andere Herangehensweise gewählt werden, die teilweise im Vergleich zur 2D-Skizze mit mehreren Ansichten einen erhöhten Modellierungsaufwand bedeutet. Da bei den Versuchspersonen noch keine Erfahrung im Umgang mit dieser Problematik bestand, war die mentale Belastung bei einer derartigen Aufgabe höher und in Folge die Bearbeitungszeit länger. Bei Objekten mit gekrümmten Oberflächen konnte das Ziel, die mentale Belastung zu verringern, noch nicht erreicht werden.

Ein Punkt, der in den Versuchen keine Rolle spielte, aber auch als Schwäche der in den Versuchen eingesetzten Version des 3D-Skizzierers angesehen werden muss, ist die fehlende Möglichkeit der Weiterverarbeitung von 3D-Skizzen in CAD-Systemen. Trotz der Tatsache, dass im dreidimensionalen Skizzierwerkzeug digitale 3D-Daten erzeugt werden, ist das verwendete Datenmodell zu dem von CAD-Programmen nicht kompatibel. Das Datenformat des 3D-Skizzierers ist voxelbasiert, d. h. die 3D-Skizzen werden durch eine Vielzahl von Punkten im Raum repräsentiert, die in der Darstellung durch Zylinder verbunden werden. In CAD-Programmen hingegen werden vektorbasierte Datenformate verwendet. Vor einer Weiterverarbeitung im CAD müssten 3D-Skizzen vektorisiert werden, was bislang in diesem System noch nicht möglich ist. Im Gegensatz zu 2D-Skizzen, die – falls digital erzeugt – ausgedruckt und als Vorlage neben den Bildschirm gelegt werden können, ist ein „Ausdruck“ von 3D-Skizzen nicht so einfach möglich. Hierzu müssten teure Verfahren wie Holographie oder Rapid Prototyping eingesetzt werden, die im Gegensatz zu Papierdruckern und -plottern im Büroumfeld nicht etabliert sind.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Hypothese der Arbeit bestätigt und der hier beschriebene Prototyp eines dreidimensionalen Skizzierwerkzeugs als richtungweisend für die zukünftige Entwicklung von CAD-Systemen angesehen werden kann. Um dieses Konzept in der Praxis konkurrenzfähig zu den etablierten Werkzeugen Handskizze und CAD zu machen, muss es die Vorteile beider in sich vereinen und dabei keine der jeweiligen Nachteile besitzen. Die identifizierten Schwächen des eingesetzten 3D-Skizzierers geben wertvolle Hinweise für die Weiterentwicklung und Verbesserung.

3.3.2 Grenzen des linienbasierten Ansatzes

Bei der Entwicklung des dreidimensionalen Skizzierwerkzeugs wurde bewusst die Linie als basales Gestaltungselement gewählt. Aufgrund der Ergebnisse des DFG-Projektes „Aufwandsarme Modelle im Konstruktionsprozess“ [PACHE 2003] war es das Ziel, die Funktiona-

lität einer 2D-Papierskizze in die dritte Dimension zu erweitern. Der dafür notwendige dreidimensionale Arbeitsraum stellt quasi eine Art virtuelles „dreidimensionales Papier“ als Arbeitsmedium dar, auf dem nicht nur auf der Tischebene, sondern auch im Raum darüber mit einem stiftartigen Eingabegerät Linien erzeugt werden können. Durch die Beschränkung auf Linien sollte die intuitive Bedienbarkeit der Papierskizze erhalten werden und es ermöglicht werden, neben Geometrie auch Symbole und Texte in einem räumlichen Kontext darzustellen.

Für die Darstellung technischer Geometrieinformationen auf Papier ist es üblich, die zu skizzierenden Objekte entweder in verschiedenen Ansichten oder als perspektivisches Bild darzustellen. Dazu ist die Linie als Gestaltungselement ausreichend. Arbeitet man in 3D und hat ausschließlich die Linie als Gestaltungselement, so kann man beispielsweise nicht einfach die Umrisslinie eines Objektes skizzieren, da dieser Umriss nur für eine Perspektive gilt. Beim linienbasierten 3D-Skizzieren muss bedacht werden, dass die 3D-Skizze aus allen Blickwinkeln betrachtet werden kann. Je nach Form des zu skizzierenden Objektes kann ein vollständiges linienbasiertes 3D-Modell mehr oder weniger einfach zu realisieren sein. Besteht ein Bauteil ausschließlich aus ebenen Flächen, so können die Kanten einfach durch Linien repräsentiert werden und die Darstellung ist unter allen Blickwinkeln korrekt. Beinhaltet das Objekt jedoch gekrümmte Flächen, so sind diese nicht so leicht wie in 2D linienbasiert darstellbar. Am einfachen Beispiel eines Zylinders lässt sich dieses Problem gut vermitteln: Auf Papier wird ein Zylinder in zwei Ansichten dargestellt – als Kreis und als Rechteck mit Mittellinie. Die perspektivische Darstellung beinhaltet zwei Ellipsen und zwei Geraden. Die Geraden stellen die Umrisslinie des Zylinders aus dem verwendeten Blickpunkt dar. Verwendet man in 3D zwei Kreise und zwei Geraden zur Darstellung eines Zylinders und ändert den Blickpunkt, so stellen die beiden Geraden nicht mehr den Umriss des Zylinders dar. Für eine verständliche Darstellung der gekrümmten Zylindermantelfläche in einer linienbasierten 3D-Skizze werden also mehr als zwei Linien benötigt. Dies bedeutet im Vergleich zur 2D-Skizze einen höheren Aufwand bei der Skizzenerzeugung und auch eine erhöhte mentale Belastung der skizzierenden Person, da es nicht eindeutig ist, wie eine gekrümmte Fläche mit Hilfe von 3D-Linien dargestellt wird.

In der Versuchsreihe mit zehn Studenten des Maschinenwesens [KAIN 2004, SCHWENTNER 2004] bestand eine der zwei gestellten Aufgaben darin, einen Cocktail bestehend aus Glas, Füllung und Dekoration zu skizzieren. Der Grund für die Wahl dieses Beispiels liegt in der Vielfalt der darin enthaltenen geometrischen Grundkörper mit gekrümmten Oberflächen: Das Cocktailglas selbst als Kegelstumpf, dazu ein Strohhalm (dünner Zylinder), eine Orangenscheibe (dicker Zylinder) und ein Schirmchen (Kugelsegment). Zusätzlich mussten einige Eiswürfel sowie die Flüssigkeit dargestellt werden. Bei der Analyse der in den Versuchen angefertigten 3D-Skizzen konnten verschiedene Vorgehensweisen für die Darstellung gekrümmter Flächen mittels 3D-Linien festgestellt werden, die im Folgenden am Beispiel des kegelförmigen Cocktailglases aufgezeigt werden.

Stellt man nur die Kanten eines Kegelstumpfes dar, so bekommt man nur zwei konzentrische Kreise in unterschiedlichen Ebenen zu sehen. Nun kann man die Umrisslinien der aktuellen Perspektive hinzufügen. Wird die Skizze jetzt um 90° um die Kegelachse gedreht, überdecken sich die Umrisslinien und es ist nicht wirklich erkennbar, dass es sich um einen Kegelstumpf handelt. Durch Hinzufügen von zwei weiteren Umrisslinien kann das 3D-Liniengebilde als Kegelstumpf interpretiert werden. Um die Form noch deutlicher zu vermitteln, können noch weitere Mantellinien dazuskizziert werden. Eine andere Möglichkeit, die Form eines Kegelstumpfs mit 3D-Linien zu modellieren, ist das Hinzufügen weiterer konzentrischer Kreise in Ebenen senkrecht zur Kegelachse. Dieser Ansatz kann auch mit den die Kegelachse schneidenden Mantellinien kombiniert werden. Prinzipiell denkbar wäre es auch, statt der konzentrischen Kreise Ellipsen, die einen Kegelschnitt darstellen, zu verwenden. Mittels einer sich verjüngenden Spirale ist es auch möglich, eine 3D-Skizze eines Kegelstumpfs mit einem einzigen Linienzug anzufertigen. Die aufwändigste und eindeutigste Variante ist das komplette ausmalen der Mantelfläche. Abbildung 3-9 zeigt die verschiedenen Varianten.



Abbildung 3-9: Verschiedene Vorgehensweisen zum linienbasierten Skizzieren eines Kegelstumpfs in 3D

Für andere gekrümmte Oberflächen gibt es eine ähnliche Vielzahl an Möglichkeiten, diese Flächen mittels 3D-Linien zu beschreiben. Bei Geometrien wie Kugeln oder Ellipsoiden fehlen Kanten gänzlich, so dass die gesamte Oberfläche aus geeigneten Flächenlinien erzeugt werden muss. Eine beobachtete alternative linienbasierte Darstellung einer Kugel war das vollständige Füllen des Kugelvolumens durch wirre Linien, ähnlich einem Wollknäuel. In

Abbildung 3-10 sind in Versuchen entstandene 3D-Skizzen von gefüllten Cocktailgläsern dargestellt. Die unterschiedlichen Vorgehensweisen zur linienbasierten Modellierung gekrümmter Flächen sind hier deutlich zu erkennen.

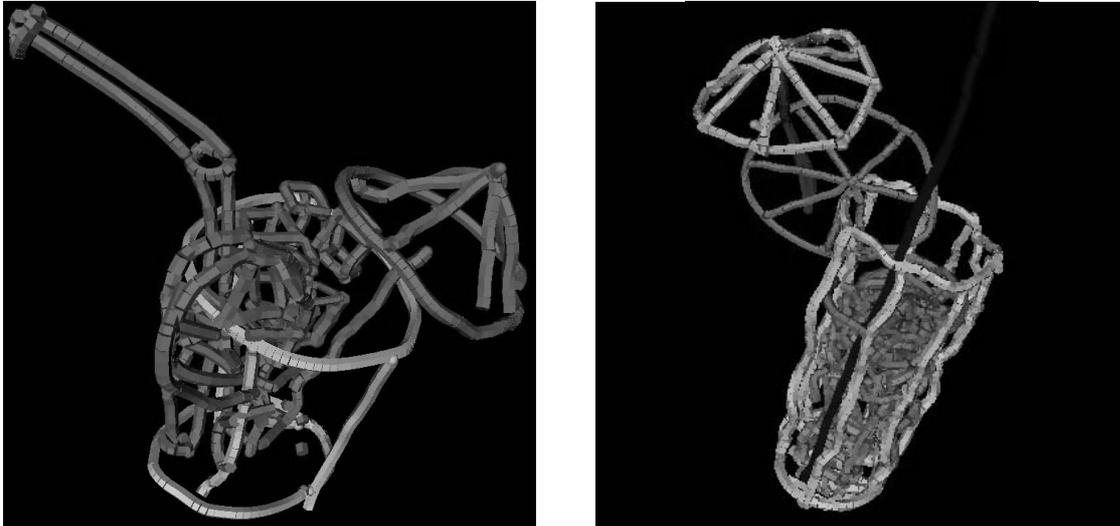


Abbildung 3-10: 3D-Skizzen eines gefüllten Cocktailglases [SCHWENTNER 2004]

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Vorteile eines linienbasierten 3D-Skizzierwerkzeugs hauptsächlich bei kantigen Objekten zur Geltung kommen. Die Staubsaugerdüse aus Abbildung 3-11 ist ein gutes Beispiel dafür. Je größer der Anteil an gekrümmten Flächen wird, desto aufwändiger wird die Modellierung mittels 3D-Linien. Aufgrund der Vielzahl an Möglichkeiten, derartige Flächen linienbasiert darzustellen, entstand der Eindruck, dass der Benutzer durch den Zwang, sich für eine der Möglichkeiten entscheiden zu müssen, von seiner eigentlichen Skizzieraufgabe abgelenkt wird.

Um kreative Gedanken unabhängig von der Art ihrer geometrischen Repräsentation möglichst einfach „aus dem Kopf in den Rechner“ zu bekommen, muss der Ansatz des linienbasierten 3D-Skizzierens um Flächen und Volumina als Gestaltungselemente erweitert werden. Damit ist durch die Notwendigkeit, ein alternatives Benutzerinterface für die Flächen- und Volumenmodellierung bereitzustellen, eine teilweise Abkehr von der Papier-Bleistift-Metapher verbunden.

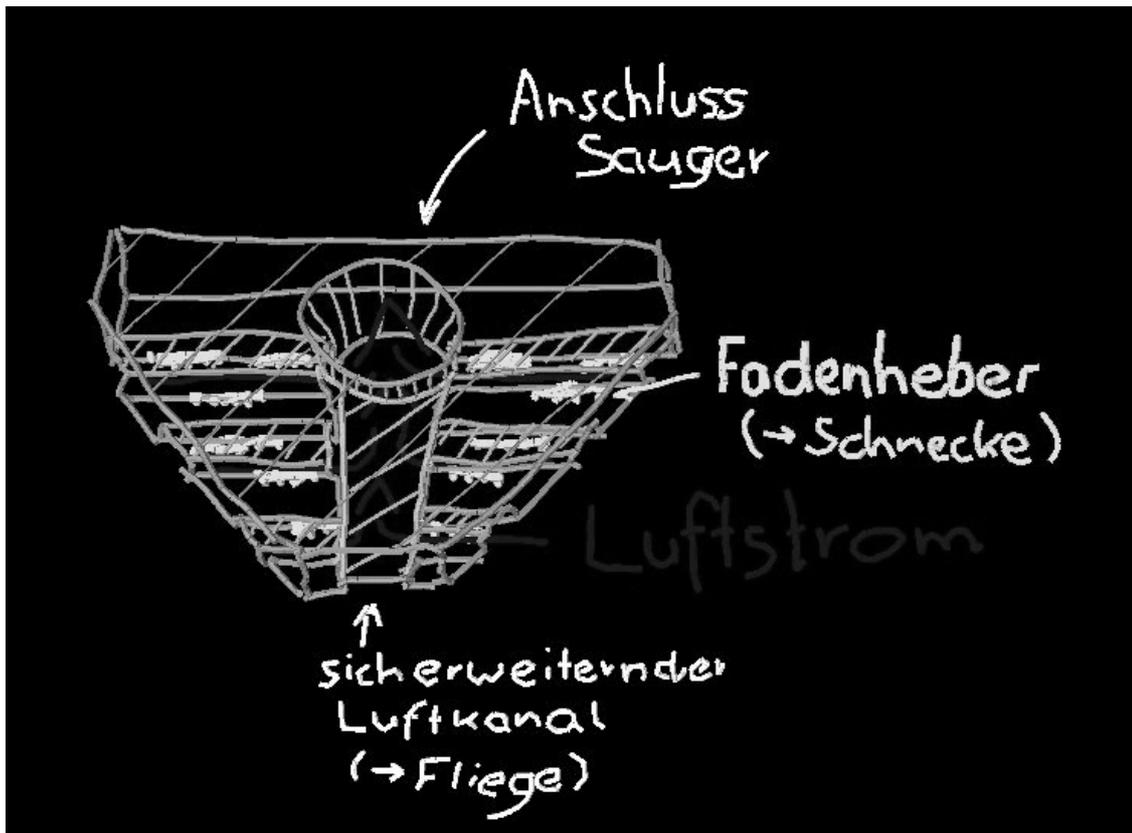


Abbildung 3-11: 3D-Skizze einer auf Basis biologischer Vorbilder entwickelten Staubsaugerdüse [FRITSCH 2002]

3.3.3 Größe des Arbeitsraums

Bei dem Versuch, den Arbeitsraum des Skizziermediums Papier um eine dritte Dimension zu erweitern, stellt sich die Frage nach der optimalen Größe dieses Arbeitsraums. Im Alltag der Produktentwicklung haben sich Standard-Papiergrößen wie A4 oder A3 als Medium für Skizzen etabliert. Für dreidimensionale Skizzierarbeitsräume gibt es jedoch noch keine Normen. Geht man von einem sitzenden oder stehenden Benutzer aus, beschränkt sich der maximal mögliche Arbeitsraum auf den Bewegungsraum des Armes, wenn man eine Vergrößerung des Arbeitsraums durch Umherlaufen ausschließt. Im Gegensatz dazu ist der Arbeitsraum, den das Eingabegerät PHANTOM® Desktop™ bietet, sehr klein.

Aufgrund der Lagerung des stiftartigen Endstücks des PHANTOM® Desktop™ über mehrere drehbare Gelenke ist der effektiv nutzbare Arbeitsraum keine einfache Geometrie wie z. B. ein Quader oder eine Kugel. Da sich die Sensoren des PHANTOM® Desktop™ am Rand des Arbeitsraums nicht mehr linear verhalten, verringert sich der effektiv nutzbare Arbeitsraum, in dem eine Übereinstimmung von Handlungs- und Wahrnehmungsraum möglich ist, auf einen Würfel von ungefähr 15 cm Kantenlänge. Die Grundfläche dieses Würfels (ca. 225 cm²)

ist damit deutlich kleiner als die Fläche eines A4-Blattes (623,7 cm²). Dies erschwert die Anfertigung detaillierter Skizzen. Maßstabsgetreue Skizzen sind nur für kleine Bauteile möglich. Auch wenn der Arbeitsraum natürlich nicht beliebig vergrößert werden kann, so wäre dennoch eine minimale Grundfläche in der Größe des gewohnten A4-Blattes sinnvoll. Die Höhe dieses quaderförmigen Arbeitsraums wird – geht man davon aus, dass der Ellenbogen aufliegt – durch den Aktionsradius des Unterarms begrenzt. Bei dem hier verwendeten Konzept ergibt sich eine weitere Einschränkung der Höhe des Arbeitsraums durch den halbtransparenten Spiegel, der zwischen dem Eingabegerät und den Augen des Benutzers angebracht werden muss. Bedingt durch die Kopplung von Handlungs- und Wahrnehmungsraum kann bei diesem Konzept der Arbeitsraum nicht beliebig erweitert werden. Möchte man einen größeren Arbeitsraum realisieren, müsste man ein grundlegend anderes Konzept der Visualisierung, z. B. mit einem Datenhelm, realisieren.

Je nach Einsatzgebiet kann es durchaus sinnvoll sein, einen Arbeitsraum im Kubikmeterbereich zur Verfügung zu haben, beispielsweise wenn es darum geht, Kabelbäume in virtuellen Rohkarossen zu verlegen. Für diejenigen Aufgabenstellungen, deren Lösungen bisher auf A4- oder A3-Bögen skizziert werden, dürfte ein 3D-Arbeitsraum mit vergleichbarer Grundfläche und 20 bis 30 cm Höhe ausreichend sein. Die Begrenzungen des Arbeitsraums sollten optisch oder alternativ bzw. ergänzend haptisch dargestellt werden können.

3.3.4 Head-Tracking

Bei der Beobachtung der Personen, die in Versuchen oder bei Demonstrationen mit dem 3D-Skizzierwerkzeug arbeiteten²³, ist aufgefallen, dass häufig versucht wurde, durch ein Verändern der Kopfposition einen anderen Blickwinkel (z. B. von der Seite) auf die virtuelle Skizze zu erhalten. Durch den anderen Blickwinkel wird es dem Betrachter erleichtert, in seiner Vorstellung ein mentales dreidimensionales Modell aufzubauen. Dies verbessert das Verständnis des betrachteten Objektes und stellt eine wesentliche Optimierung der Wahrnehmung dar. Aus diesem Grund schätzte SUTHERLAND [1968] bei der Entwicklung des ersten Head-Mounted-Displays die Berücksichtigung der Kopfposition noch wichtiger als die Stereodarstellung ein.

Ohne eine Einbeziehung der Kopfposition in die Darstellungsberechnung für die 3D-Skizze ist es nicht möglich, dieses natürliche und intuitive Verhalten zu unterstützen. Die Darstellung im Prototyp des 3D-Skizzierers erfolgt jedoch ausschließlich für exakt die Kopfposition, mit der das System kalibriert wurde. Wird diese Position verlassen, erscheint die 3D-Skizze ver-

²³ Im Rahmen von Versuchen wurden 16 Personen untersucht; bei mehreren Demonstrationen konnten insgesamt über 100 Personen bei der Benutzung des 3D-Skizzierers beobachtet werden.

zerrt und entspricht nicht mehr der Erwartung des Benutzers. Dies zwingt ihn zu einer starren und unnatürlichen Arbeitsposition.

Für die Ermittlung der Kopfposition (Head-Tracking) müssen geeignete Sensoren verwendet werden, die die Position und Neigung des Kopfes in sechs Freiheitsgraden messen. Diese Sensorik sollte bei Bedarf möglichst einfach am Kopf befestigt werden können, z. B. als Teil einer Brille oder einer Schirmmütze. Für diese Aufgabenstellung bieten sich optische oder magnetische Trackingsysteme aus dem Virtual-Reality-Bereich an. Magnetische Trackingsysteme haben gegenüber optischen Systemen den Nachteil, dass sie leicht durch andere elektromagnetische Felder oder durch Betonarmierungen gestört werden. Dafür sind sie aber in der Regel preisgünstiger. Mit einem zur Verfügung stehenden magnetischen Trackingsystem, das Teil einer VR-Installation mit Projektionstisch ist und dort zur Ermittlung von Hand- und Kopfposition zum Einsatz kommt, wurde eine Erweiterung der Funktionalität des 3D-Skizzierers um Head-Tracking realisiert. Die prinzipielle Machbarkeit konnte mit einer entsprechend erweiterten Version des 3D-Skizzierer-Prototypen nachgewiesen werden [SCHNEIDER & JUNG 2003]. Allerdings war der Einfluss des elektromagnetischen Feldes des Röhrenmonitors auf das Trackingsystem so stark störend, dass es nicht gelang, bei fixer Kopfposition ein ruhiges Bild zu realisieren. Verstärkt wird dieser Effekt durch die geringe Entfernung des Röhrenmonitors vom Kopf des Betrachters.

Bedingt durch die Tatsache, dass es sich beim Neigen des Kopfes um ein intuitives Verhalten handelt, bietet es sich an, in zukünftige Versionen des 3D-Skizzierwerkzeugs eine Head-Tracking-Funktionalität mittels eines störungsfreien (z. B. optischen) Trackingsystems zu integrieren. Dies würde den Nutzen des 3D-Skizzierers weiter steigern und zu einer höheren Akzeptanz der Benutzer führen.

3.4 Zusammenfassung und Fazit

Um praktische Erfahrungen mit dreidimensionalem Skizzieren zu sammeln, wurde ein geeignetes Werkzeug entwickelt und aufgebaut. Basierend auf dem aus verschiedenen Einsatzszenarien ausgewählten „Erweiterten CAD-Arbeitsplatz“ wurde zunächst in einer Machbarkeitsstudie die technische Realisierbarkeit eines Werkzeugs zum Anfertigen dreidimensionaler Skizzen unter Beweis gestellt. Ein daraus weiterentwickelter Prototyp diente als Basis für Versuche. Als einen wesentlichen Vorteil dreidimensionaler Skizzen erachteten die Benutzer die Tatsache, dass eine Skizze gedreht und aus sämtlichen Perspektiven betrachtet werden kann, wodurch das bei Papierskizzen notwendige zeitintensive Anfertigen von verschiedenen Ansichten, Schnitten und perspektivischen Darstellungen entfallen kann. Auch die im Vergleich zu CAD-Systemen intuitivere Bedienung bei der Erstellung von 3D-Skizzen zählt zu den identifizierten Stärken des untersuchten Ansatzes.

Auf der anderen Seite wurden bei den Versuchen auch implementierungs- und aufbaubedingte Schwächen identifiziert. So stößt der auf der Stift-Papier-Metapher basierende Ansatz, die Linie als basales Gestaltungselement einzusetzen, beim Skizzieren von Körpern mit gekrümmten Oberflächen an seine Grenzen. Das Fehlen von über die Basisfunktionalität hinausgehenden Komfortfunktionen, die in kommerziellen CAD- und Grafiksystemen zur Standardausstattung zählen, die stark eingeschränkte Weiterverarbeitbarkeit der 3D-Skizzen in CAD-Systemen sowie die fehlende Einbeziehung der Kopfposition in die Bildberechnung sind weitere Nachteile, die einem Praxiseinsatz im Weg stehen.

Die in der Hypothese dieser Arbeit postulierten Vorteile von 3D-Skizzen gegenüber Papier-skizzen konnten in den durchgeführten Versuchen bestätigt werden. Damit dreidimensionale Skizzen in Zukunft einen messbaren Beitrag zur Optimierung von Produktentwicklungsprozessen leisten können, müssen die bestehenden Schwächen bei der Entwicklung zukünftiger Systeme beseitigt werden. Aus diesem Grund wurden verschiedene Ansätze zur Weiterentwicklung erarbeitet, auf die im folgenden Kapitel eingegangen wird.

4 Ansätze zur Weiterentwicklung

Basierend auf den Erfahrungen aus den Versuchen und Beobachtungen lassen sich Ansätze zur Weiterentwicklung des 3D-Skizzierers ableiten, die in diesem Kapitel beschrieben werden. Neben im Rahmen dieser Arbeit detailliert ausgearbeiteten Konzepten zu Bedienung und Konkretisierung werden konkrete Anregungen zur mittelfristigen Umsetzung gegeben und visionäre Ideen diskutiert.

4.1 Bedienkonzepte

Bedingt durch die in Kapitel 3.3.2 beschriebenen Grenzen des linienbasierten Ansatzes ist die reine Übertragung der Papier-Bleistift-Metapher in den dreidimensionalen Raum für zukünftige Skizzierwerkzeuge nicht ausreichend. Gibt es ausschließlich die dreidimensionale Linie als Gestaltungselement, muss man, um Objekte mit gekrümmten Flächen zu erzeugen, aufwendig mit vielen Hilfslinien arbeiten. Damit solche Objekte einfacher, schneller und intuitiver eingegeben werden können, sollte das bestehende Bedienkonzept dahingehend erweitert werden, dass neben dreidimensionalen Linien auch Flächen und Volumina als Gestaltungselemente zur Verfügung stehen. Dadurch erweitert sich die Funktionalität eines 3D-Skizzierers in Richtung existierender Werkzeuge zur Geometriemodellierung. Deren Bedienkonzepte sind allerdings wenig intuitiv und basieren auf zweidimensionaler Ein- und Ausgabe. Für ein Werkzeug, das frühe Phasen der Geometriemodellierung unterstützen soll, ist daher ein neues Bedienkonzept notwendig, das die Intuitivität der Papierskizze mit der Grundfunktionalität eines CAD-Systems unter Einsatz von Virtual- und Augmented-Reality-Technologien verbindet.

Die wesentlichen Anforderungen an ein derartiges Bedienkonzept und die darauf aufbauende grafische Benutzerschnittstelle sind:

- Interaktion in Echtzeit
- Schneller und intuitiver Zugriff auf die verfügbaren Funktionen
- Einfaches Bewegen und Drehen der gesamten Skizze oder von Teilen davon
- Erschließen eines großen Funktionsumfangs bei einer geringen Anzahl an Interaktionselementen

Vor der Konzeption eines entsprechenden Bedienkonzeptes sind einige grundlegende Entscheidungen bezüglich der Art und Umsetzung der Interaktion zu treffen. Zunächst ist festzulegen, ob ein oder zwei Hände zur Bedienung eingesetzt werden sollen. Ein weiterer Aspekt,

der die Gestaltung des Bedienkonzeptes wesentlich beeinflusst, ist die Erfassung der Benutzerinteraktion. Hier muss zwischen gestenbasierter und werkzeuggesteuerter Interaktion entschieden werden. In beiden Fällen ist es möglich, kraftreflektierende Eingabegeräte einzusetzen und damit die visuelle Darstellung um haptisch-taktile Sinneseindrücke zu erweitern. Werden beide Hände zur Bedienung eingesetzt, sind prinzipiell auch Kombinationen der beschriebenen Alternativen möglich.

Ein Bedienkonzept kann die Möglichkeiten, die kraftreflektierende Eingabegeräte bieten, gezielt integrieren. Auch wenn durch die Verschmelzung von Handlungs- und Wahrnehmungsraum Punkte wie z. B. Linienenden leichter getroffen werden, kann dieser Prozess durch haptisch unterstützte Fangfunktionen weiter optimiert werden. Force Feedback²⁴ bietet darüber hinaus nicht nur die Möglichkeit, die skizzierten virtuellen Objekte zu fühlen, sondern auch virtuelle Hilfsebenen fühlbar zu machen. Damit kann bei Bedarf vorübergehend eine zweidimensionale Skizzierumgebung erzeugt werden, die beispielsweise die Anfertigung von Textelementen in 3D-Skizzen erleichtert. Bei der Entscheidung für die Integration von Force Feedback in ein Bedienkonzept müssen die hohen und in starkem Maße vom Arbeitsraum abhängigen Anschaffungskosten für kraftreflektierende Eingabegeräte mitberücksichtigt werden, die in einem sinnvollen Verhältnis zum erwarteten Zusatznutzen stehen sollten.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Bedienkonzept auf Basis der genannten Anforderungen entwickelt [MÜLLER ET AL. 2004]. Es basiert auf der zweihändigen Interaktion und verwendet unterschiedliche Eingabegeräte. Die Verteilung von Funktionen auf zwei Eingabegeräte verhindert die Überfrachtung eines einzelnen Eingabegeräts. Das Bedienkonzept ist primär auf den Einsatz in dem in Kapitel 3.2 beschriebenen Aufbau ausgelegt, ist jedoch auch auf andere Umgebungen transferierbar. Die Erzeugung und Manipulation von dreidimensionalen Geometrieinformationen sowie die Interaktion mit der graphischen Benutzeroberfläche erfolgt mit einem stiftbasierten Eingabegerät wie dem PHANTOM® Desktop™ der Firma SensAble™. Mit dem zweiten Eingabegerät kann schnell und einfach in der virtuellen Welt navigiert werden. Hierzu bietet sich die SpaceMouse® oder ein funktional vergleichbares Gerät an. So wie die passive Hand beim zweidimensionalen Skizzieren für die situationsangepasste Positionierung des Papiers zuständig ist, übernimmt sie hier die Aufgabe der Positionierung der dreidimensionalen Skizze im Arbeitsraum.

Kernbestandteil des Bedienkonzeptes ist eine graphische Benutzeroberfläche, die die gesamte Funktionalität des Skizzierwerkzeugs einschließlich einer Erweiterung zur Generierung einfacher Volumina unterstützt und somit ablenkende Tastatureingaben überflüssig macht. Die Herausforderung bei der Entwicklung der graphischen Entwickleroberfläche bestand darin, den zusätzlichen Freiheitsgrad der dritten Dimension sinnvoll und nicht nur wegen seiner E-

²⁴ Force Feedback bedeutet auf Deutsch etwa „Rückmeldung durch Kraft“

xistenz zu nutzen. Durch die Orientierung an vertrauten Elementen aus zweidimensionalen Benutzeroberflächen soll eine intuitive, erwartungskonforme Bedienung ermöglicht werden. Die graphische Benutzeroberfläche wurde als dynamisches zweidimensionales Menü in Form einer Palette realisiert, das sich standardmäßig in der linken oberen hinteren Ecke des quaderförmigen Arbeitsraums befindet (siehe Abbildung 4-1). Durch Drücken einer Taste am Eingabegerät der passiven Hand wird das Menü an die momentane Position des 3D-Cursors verschoben. Damit können sehr schnell und einfach alle Funktionen erreicht werden, ohne den Cursor aus seiner Ausgangsposition zu verschieben. Die angebotenen Funktionen werden durch Tippen mit der Stiftspitze des primären Eingabegeräts auf das entsprechende Icon aktiviert, anschließend kehrt das Menü an seine Standardposition zurück und der Benutzer kann seine kreative Arbeit in unmittelbarer Nähe zu seiner letzten Cursorposition vor dem Aufruf des Menüs fortsetzen. Dadurch und durch die kreisförmige Anordnung der Icons werden die mit dem Eingabegerät zurückzulegenden Strecken minimiert und der Benutzer kann seinen Blick und seine Konzentration auf die Skizze richten ohne durch die Werkzeugbedienung abgelenkt zu werden.

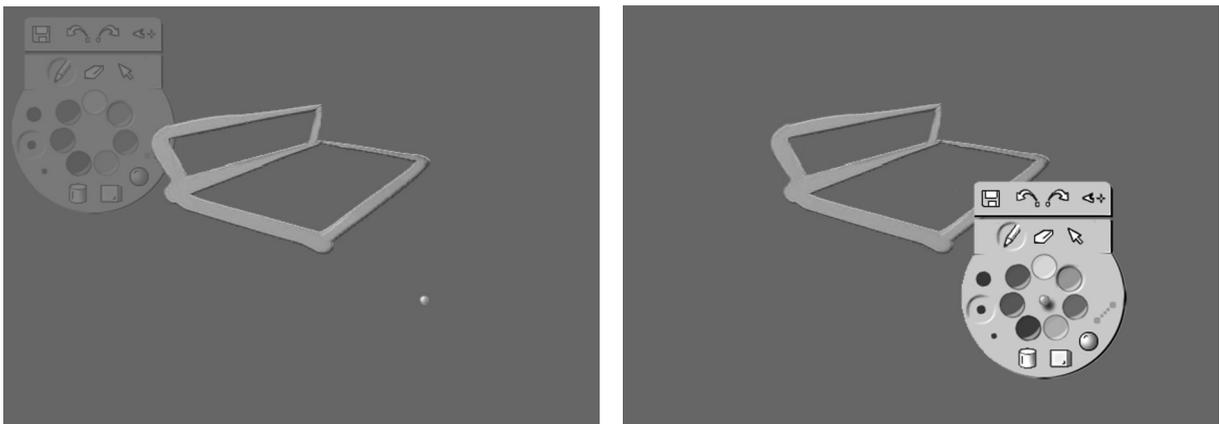


Abbildung 4-1: Die graphische Benutzeroberfläche: Standardposition (links) und aktiviert an der Cursorposition (rechts)

Das Menü ist in fünf Bereiche aufgeteilt (siehe Abbildung 4-2). Funktionen, die in direkter Beziehung zum Skizzierprozess stehen, sind in zwei konzentrischen Kreisen angeordnet. Der innere Kreis besteht aus der Farbpalette, wodurch der Benutzer die Linienfarbe sehr schnell ändern kann. Im äußeren Kreis befinden sich drei verschiedene Bereiche: Mit der Strichstärkenauswahl kann der Benutzer rasch den Durchmesser der dreidimensionalen Linie ändern. Um vom Skizziermodus in den Lösch- oder Auswahlmodus zu wechseln muss der Benutzer lediglich auf das entsprechende Icon im Moduswahlbereich tippen. Abhängig vom gewählten Modus erscheinen spezifische Icons im rechten unteren Bereich des äußeren Kreises. Grundlegende Systemfunktionen wie Speichern oder Rückgängig befinden sich in einem Balken oberhalb der zwei konzentrischen Kreise. Da diese Funktionen während des Skizzierprozesses

nicht so häufig benutzt werden wie die Zeichenfunktionen, ist die Entfernung zum Cursor, der sich nach Aktivierung des Menüs im Mittelpunkt der konzentrischen Kreise befindet, etwas größer, verglichen mit statischen Icons am Rand aber immer noch verhältnismäßig klein.

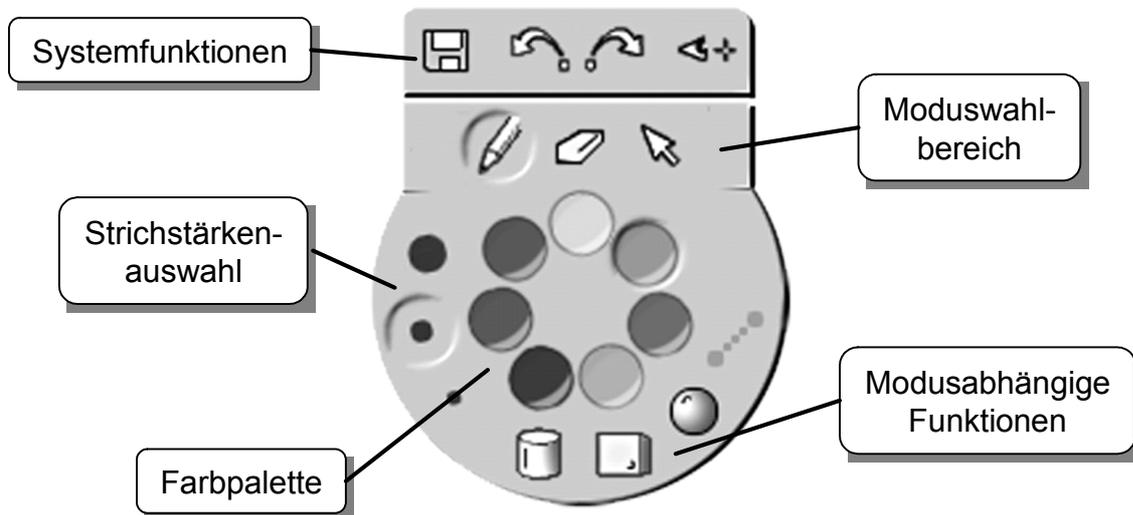


Abbildung 4-2: Struktur des Menüs

Das Interaktionskonzept basiert auf drei Modi: Skizzieren, Löschen und Auswählen. Je nach gewähltem Modus bietet die graphische Benutzeroberfläche unterschiedliche Funktionen an. Abbildung 4-3 zeigt das Erscheinungsbild des Menüs in den verschiedenen Modi. Im Skizziermodus kann der Benutzer primär linienbasierte dreidimensionale Skizzen in verschiedenen Linienstärken und Farben erzeugen. Dabei kann er zwischen Freihandlinien und geradlinigen Punkt-zu-Punkt-Verbindungen wählen. Geometrien mit ebenen Flächen können auf diese Weise leicht als 3D-Drahtmodell dargestellt werden. Bei Geometrien mit gekrümmten Flächen stößt dieser Ansatz an seine Grenzen. Um den kreativen Entwurfsprozess nicht durch Überlegungen zur Darstellung gekrümmter Flächen durch Linien zu stören, werden Funktionen zum Zeichnen einfacher Geometrien wie Kugeln und Zylinder angeboten. Auch Würfel können auf diese Weise einfacher als durch das Zeichnen von zwölf Linien erzeugt werden. Bei Bedarf kann das Menü problemlos um weitere Grundgeometrien ergänzt werden. Da der Fokus des Bedienkonzeptes auf der Unterstützung kreativer Prozesse in frühen Phasen der Konzeptentwicklung liegt, ist eine exakte Bemaßung der erzeugten Geometrie im Gegensatz zu CAD-Systemen nicht vorgesehen.

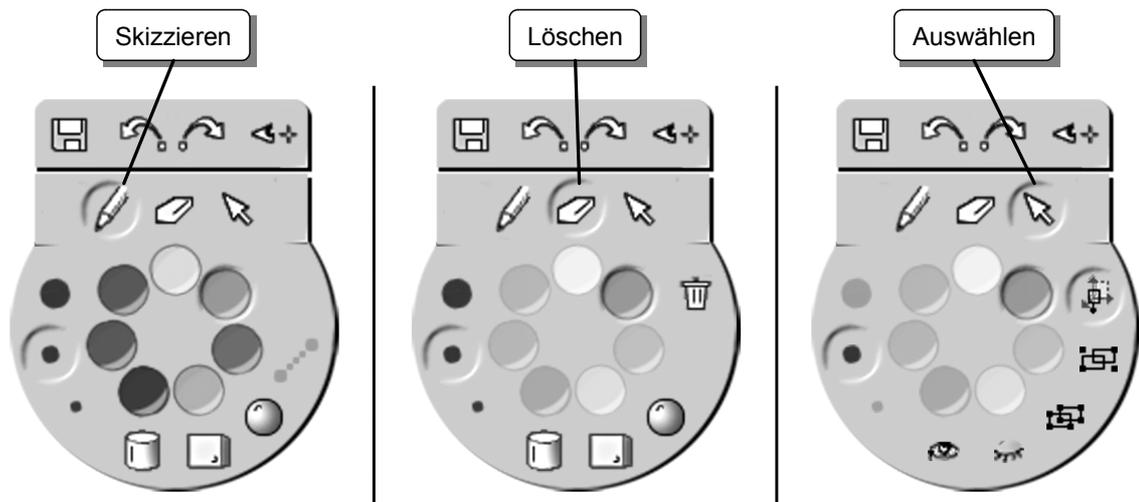


Abbildung 4-3: Das Menü im Skizziermodus (links), Löschmodus (mitte) und Auswahlmodus (rechts)

Gelegentlich machen Benutzer Fehler oder möchten Änderungen vornehmen. Durch Auswahl des Löschmodus wird der kugelförmige Cursor zu einem 3D-Radierer und jedes Objekt im Arbeitsraum, das mit dem Cursor kollidiert, wird gelöscht. Die Größe des Radierers kann dabei über die Strichstärkenauswahl angepasst werden. Neben einem allgemeinen Löschmodus, der auf Voxel-Ebene sämtliche Kollisionspartner entfernt, ist auch ein bedingter Löschmodus vorgesehen. Abhängig von ausgewählten Eigenschaften werden z. B. nur dünne rote Linien oder nur Zylinder gelöscht.

Der Benutzer kann mit der SpaceMouse® jederzeit Navigationsoperationen durchführen. Auf diese Weise können 3D-Skizzen von anderen Blickwinkeln aus betrachtet werden und die Fortführung des Skizzierprozesses aus einer anderen Perspektive ermöglicht werden. Im Skizzier- und Löschmodus wirken sich die Navigationsoperationen auf die gesamte Skizze aus, wie dies auch im Zweidimensionalen beim Positionieren des Papiers auf dem Tisch der Fall ist. Im Auswahlmodus ist es dagegen möglich, einzelne Elemente der 3D-Skizze neu zu positionieren. Dazu müssen diese Elemente durch Aufziehen eines Auswahlquaders, der halbtransparent dargestellt wird, selektiert werden. Alle Elemente innerhalb des Quaders sind nun ausgewählt und können zusätzlich gruppiert werden, um diese Auswahl festzuhalten. Die selektierten Objekte können unabhängig von den anderen Objekten im Arbeitsraum bewegt, gedreht, positioniert und skaliert werden. Die Durchführung dieser Navigationsoperationen ist sehr einfach: ohne vorher spezielle Icons oder Tasten bedienen zu müssen, können die selektierten Objekte unter Ausnutzung der sechs Freiheitsgrade der SpaceMouse® intuitiv an die vom Benutzer gewünschte Position bewegt werden. Eine Unterscheidung zwischen Translation und Rotation wie bei vielen 2D-Benutzerschnittstellen ist hierbei nicht erforderlich. Statt der SpaceMouse® ist auch der Einsatz eines zweiten PHANTOM®-Eingabegeräts für die passive Hand denkbar. Dies würde einerseits die Bedienung weiter vereinfachen, da durch die

Wegsteuerung Objekte leichter und genauer positioniert werden können als mit der Geschwindigkeitssteuerung der SpaceMouse®. Andererseits sind mit dem Einsatz eines zweiten PHANTOM®-Eingabegeräts auch nicht unerhebliche Mehrkosten verbunden.

Das beschriebene Konzept einer Benutzerschnittstelle für zukünftige Werkzeuge zur Geometriemodellierung in frühen Phasen berücksichtigt die Ergebnisse der durchgeführten Versuche sowie Anregungen von Erstanwendern. Als nächster Schritt steht eine prototypische Realisierung an, die durch die Ergebnisse praxisnaher Usability-Tests erweitert und optimiert werden kann. Denkbar ist zum Beispiel eine Erweiterung um Spracheingabe und -ausgabe. Eine gelungene Umsetzung des beschriebenen Bedienkonzepts besitzt das Potenzial, wegweisend für die Etablierung einer standardisierten graphischen Benutzerschnittstelle für den Umgang mit dreidimensionalen Geometriedaten in Virtual- und Augmented-Reality-Umgebungen zu sein, um die heutigen heterogenen Lösungen abzulösen.

4.2 Unterstützung des Konkretisierungsprozesses

Ein weiteres im Rahmen dieser Arbeit in einem Kooperationsprojekt entwickeltes Konzept zur Weiterentwicklung des 3D-Skizzierers beschäftigt sich mit der Unterstützung des Konkretisierungsprozesses [DIEHL ET AL. 2004]. Darunter wird in diesem Zusammenhang ganz allgemein das Ausarbeiten und Detaillieren von in Skizzen festgehaltenen Konzepten verstanden. Ausgehend von Papierskizzen bestehen verschiedene Möglichkeiten, diesen Prozess durchzuführen. Neben dem Anfertigen von weiteren, detaillierteren Handskizzen kann auch mit der Modellierung in CAD begonnen werden. Bei der Übertragung von Handskizzen in das CAD-System kommt es zwangsläufig zu einer Konkretisierung, da Formen und Maße exakt angegeben werden müssen. Bei der weiteren Detaillierung des CAD-Modells können wiederum Skizzen als Hilfsmittel eingesetzt werden um ursprünglich noch nicht festgelegte Details auszuarbeiten und festzuhalten. Dabei dienen auch CAD-Ausdrucke, die um die noch nicht festgelegten Details ergänzt werden, als Medium. Die so festgehaltenen Ergebnisse werden dann wiederum manuell in das CAD-System übertragen. Auf Basis der beschriebenen Konkretisierungsschritte hat THURNER [2004] im Rahmen einer Projektstudie ein Modell für Konkretisierungsprozesse entwickelt (siehe Abbildung 4-4). Einzelne Konkretisierungsschritte können als eigene kleine Problemlösezyklen gesehen werden. HACKER [2002] beschreibt den Prozess des Konstruierens daher als Zusammensetzung von Gestaltungs- und Bewertungszyklen.

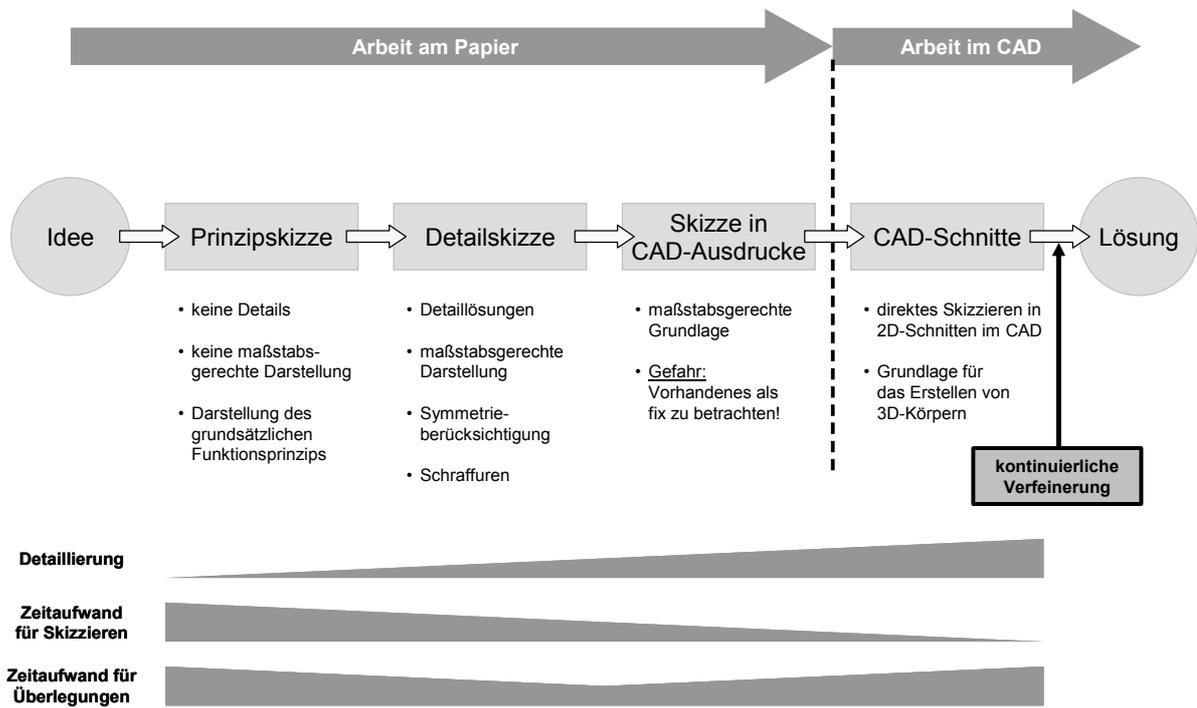


Abbildung 4-4: Modell für Konkretisierungsprozesse [THURNER 2004]

Während die Konkretisierung von Handskizzen in der Regel mit einem Medienbruch verbunden ist, besteht dieser bei der Konkretisierung dreidimensionaler Skizzen auf den ersten Blick nicht. Dreidimensionale Skizzen werden genauso wie CAD-Modelle rechnerunterstützt erzeugt. Die jeweils gespeicherten Informationen sind jedoch in Datenformat und Detaillierungsgrad sehr unterschiedlich. Bei dreidimensionalen Skizzen wird ein hochauflösendes, voxelbasiertes Format verwendet, während CAD-Modelle auf Vektorgeometrien basieren. Ein Zwang zur Konkretisierung der Geometriedaten entsteht hier nicht durch einen Wechsel des Mediums, sondern durch einen Wechsel von Applikation und Datenformat. Zur Übertragung in ein CAD-System können Papierskizzen einfach neben den CAD-Arbeitsplatz gelegt werden. Bei dreidimensionalen Skizzen ist dies nicht möglich, da sie nicht körperlich existieren. Da übliche CAD-Arbeitsplätze bisher Stereodarstellung nicht unterstützen, können dort 3D-Skizzen nur eingeschränkt, d. h. perspektivisch in 2D betrachtet werden. Dies erschwert die manuelle Übertragung in ein CAD-System und die damit Konkretisierung der dreidimensionalen Skizze.

Als Alternative zur direkten Weiterverarbeitung von dreidimensionalen Skizzen in CAD-Systemen bietet sich eine Unterstützung des Konkretisierungsprozesses in der immersiven Systemumgebung des 3D-Skizzierers an. Der 3D-Skizzierer soll dabei nicht durch ein immersives CAD-System ersetzt werden, sondern um assistierende Software ergänzt werden, die bereits während des Skizziervorgangs oder im Anschluss daran eine teilautomatisierte Konkretisierungsunterstützung bietet. Das Ergebnis stellen aus den Skizzen abgeleitete Vektorge-

ometrien mit groben Abmessungen dar, die ohne weitere manuelle Konkretisierungsschritte in CAD-Systeme eingelesen und weiterverarbeitet werden können. Für die Realisierung einer derartigen Konkretisierungsunterstützung ist es notwendig, im Datenmodell des 3D-Skizzierers nicht nur die Position der Skizzenelemente zu speichern, sondern auch den zeitlichen Verlauf der Erzeugung der Skizzenelemente. Zusätzlich muss es um die Fähigkeit zur Verwaltung von vektorbasierten Geometrieinformationen erweitert werden, die durch die Konkretisierung von Teilbereichen einer 3D-Skizze entstehen. Bei der Konkretisierung soll die ursprüngliche Skizze nicht verloren gehen, sondern weiterhin gespeichert bleiben um bei Bedarf alternativ oder zusätzlich zur konkretisierten Geometrie angezeigt zu werden.

Die folgende Abbildung 4-5 zeigt exemplarisch für einen Würfel Ausgangssituation, mögliche Zwischenschritte und das Endergebnis des softwareassistierten Konkretisierungsprozesses.

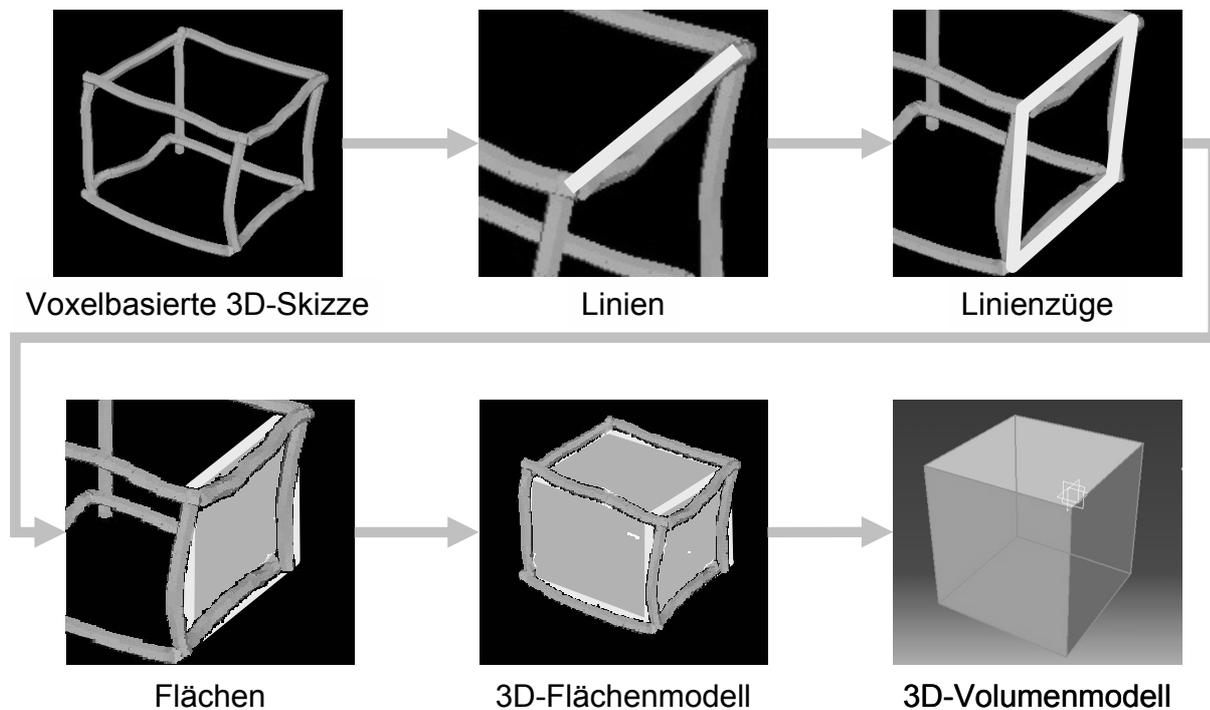


Abbildung 4-5: Softwareassistierte Konkretisierung einer 3D-Skizze

Konkretisierung während des Skizzierprozesses

Eine Möglichkeit, bereits während des Skizzierprozesses konkrete Geometrieobjekte zu erzeugen, stellt die in Kapitel 4.1 beschriebene Möglichkeit dar, einfache Geometrien nach Auswahl einer entsprechenden Schaltfläche im Raum aufzuziehen. Dies erfordert jedoch die aktive Auswahl durch den Benutzer und unterbricht damit den Erzeugungsprozess der linien-

basierten 3D-Skizze. Durch eine Interpretation der eingegebenen 3D-Linien kann eine Konkretisierungsunterstützung realisiert werden, die weniger stark den Skizzierprozess unterbricht. Eine Möglichkeit dazu stellt die Gestendefinition und -interpretation dar. Statt Icons werden hier spezielle Bewegungsmuster verwendet, die die Erzeugung von konkreten Geometrieobjekten auslösen. Diese Bewegungsmuster können auch als 3D-Gesten bezeichnet werden und repräsentieren die korrespondierende Geometrie in vereinfachter Form. Wenn eine im System definierte Geste vom Benutzer skizziert wird, wird angeboten, die entsprechende Skizze durch eine Vektorgeometrie zu ersetzen. Abbildung 4-6 zeigt dies exemplarisch für einen Kegel. Größe und Position bestimmen sich aus der ursprünglichen Skizze. Dieser Ansatz hat Parallelen zur rechnerbasierten Schrifterkennung und erfordert ein Erlernen der im System definierten Gesten.

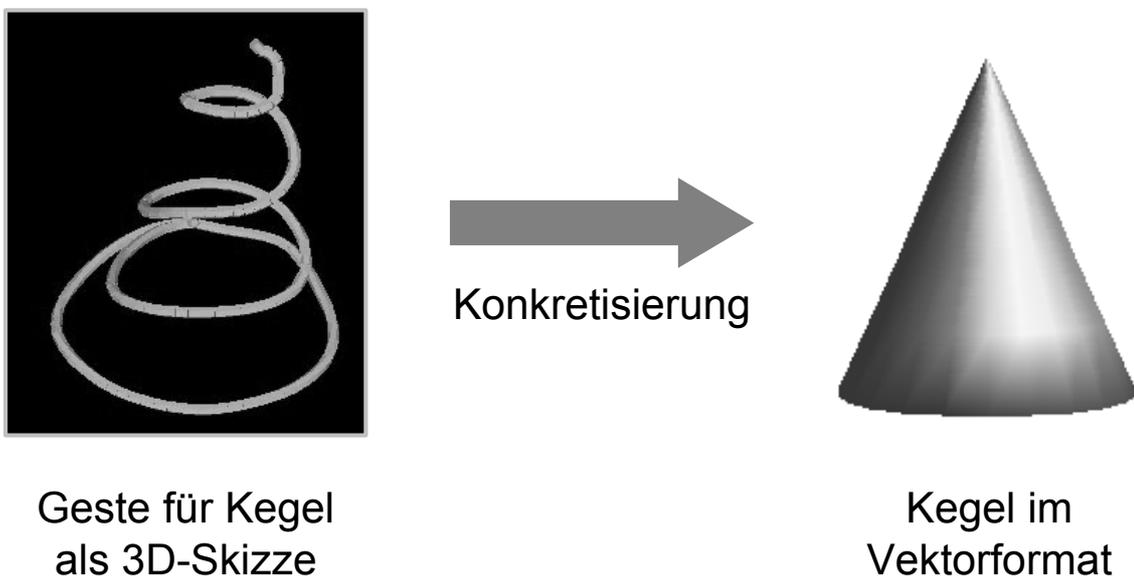


Abbildung 4-6: Geste-basierte Konkretisierung

Eine Erweiterung des Gestenansatzes stellt die Idee der intelligenten Absichtserkennung dar. So früh wie möglich soll das Konkretisierungssystem von sich aus erkennen, welche Intention der Benutzer mit seinen skizzierten 3D-Linien verfolgt. Das Ergebnis der Absichtserkennung wird dem Benutzer so angezeigt, dass er auf Wunsch diese auswählen kann. Sollte die vorgeschlagene Geometrie nicht zutreffend sein, besteht die Möglichkeit ungehindert weiterzuarbeiten. Dadurch wird vermieden den Benutzer durch einen Bestätigungszwang in seinem kreativen Prozess zu hemmen. Der Vorschlag des Konkretisierungsassistenten könnte beispielsweise als halbtransparente Geometrie der Skizze überlagert dargestellt werden. So kann der Benutzer sofort sehen, ob die vorgeschlagene Geometrie der Skizze und damit seiner Intention entspricht. Bei Annahme des Vorschlags wird die angefangene Skizze bzw. Teilskizze durch die entsprechende Vektorgeometrie ersetzt.

Dieses Vorgehen gestaltet sich dann problematisch, wenn aufgrund von Mehrdeutigkeiten kein eindeutiger Vorschlag gemacht werden kann. Zeichnet ein Benutzer beispielsweise zwei zueinander rechtwinklige Rechtecke, so könnte der Konkretisierungsassistent vermuten, dass der Benutzer einen Quader zeichnen möchte. Möchte der Benutzer jedoch lediglich diese zwei Rechtecke zeichnen oder mit dieser Basis eine andere Geometrie skizzieren, würde ihm der vorgeschlagene Quader nicht weiterhelfen. Da die gleichzeitige Überlagerung der Skizze mit mehreren Vorschlägen nicht praktikabel ist, müssen diese separat angezeigt werden (siehe Abbildung 4-7).

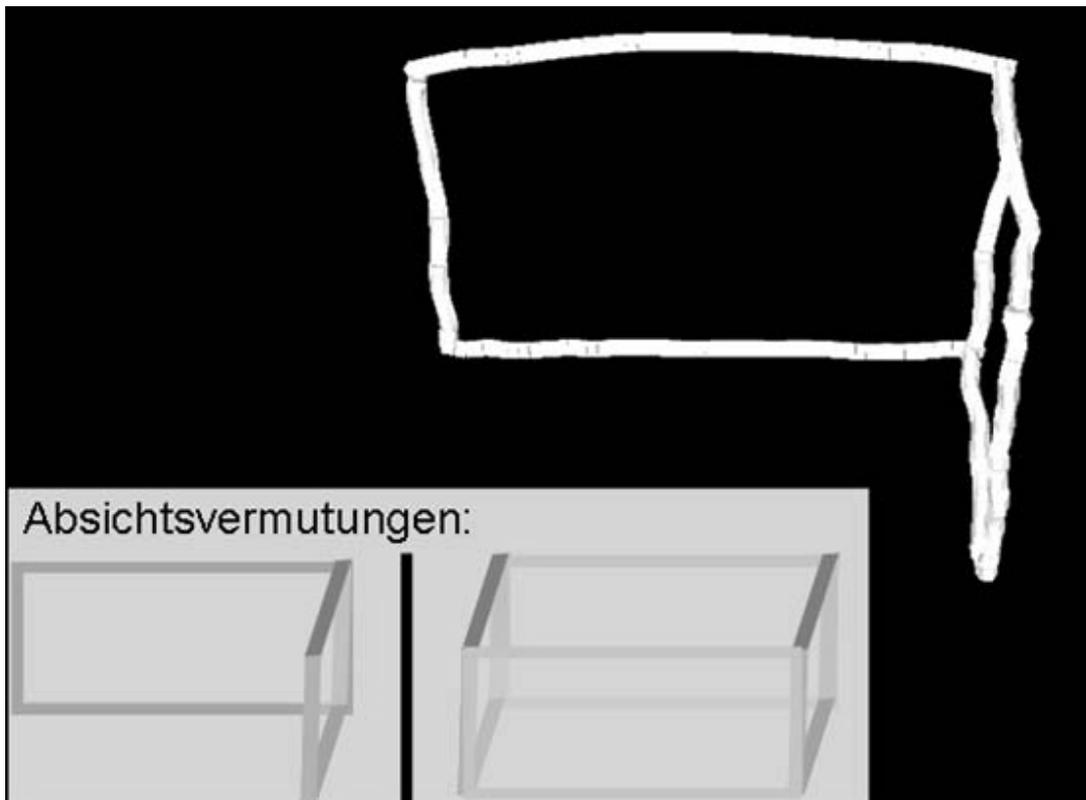


Abbildung 4-7: Darstellung mehrerer Konkretisierungsvorschläge in einem separaten Bereich

Teilautomatisierte Konkretisierung im Anschluss an den Skizzierprozess

Ein alternativer Ansatz zur Konkretisierungsunterstützung während des Skizzierprozesses ist das Auslagern der assistierten Konkretisierung in einen separaten nachfolgenden Prozessschritt. Damit entfallen Modifikationen am Skizzierprozess, die möglicherweise den Benutzer in seinem kreativen Arbeitsfluss hemmen. Auf der anderen Seite bedeutet der zusätzliche Prozessschritt aber auch einen erhöhten zeitlichen Aufwand für den Entwickler/Konstrukteur.

Inhalt dieses Ansatzes ist es, eine vorhandene linienbasierte 3D-Skizze im Dialog mit dem Ersteller nachzubearbeiten und dabei schrittweise zu konkretisieren und in ein vektororientiertes Geometriedatenformat zu überführen. Dabei sind verschiedene Automatisierungsgrade vorstellbar, die sich zwischen den Extremen „manuelle Nachmodellierung“ und „vollautomatische Konvertierung“ bewegen. Bei der Entwicklung eines derartigen teilautomatisierten Assistenzsystems muss ein geeigneter Kompromiss zwischen häufigen kleinräumigen Vorschlägen und selteneren großräumigeren Vorschlägen, welche möglicherweise fehlerbehaftet sind, gefunden werden. Für die Identifikation einzelner Objekte können gleiche oder ähnliche Verfahren wie bei der Absichtserkennung während des Skizziervorgangs eingesetzt werden, die die 3D-Skizze nicht nur anhand ihrer Geometriedaten, sondern auch auf Basis des zeitlichen Verlaufs der Skizzenerstellung analysieren. Zeitlich und örtlich nahe beieinander liegende Linien können auf diese Weise leichter zu einem Objekt zusammengefasst werden. Dadurch kann die dreidimensionale Skizze vom Assistenzsystem in verschiedene Bereiche aufgeteilt werden, die schrittweise im Dialog mit dem Benutzer konkretisiert werden. Alternativ können die Bereiche auch vom Benutzer ausgewählt werden, was allerdings einen geringeren Automatisierungsgrad bedeutet und damit vom Interaktionsbedarf näher an einer manuellen Neumodellierung liegt. Eine vollautomatische Konkretisierung der gesamten Skizze in einem Schritt dürfte schwierig zu realisieren sein und birgt auf Grund der Unschärfe des Ausgangsmaterials erhebliche Risiken für Missinterpretationen. Der in diesem Teilkapitel beschriebene assistierte Konkretisierungsprozess stellt sowohl hinsichtlich Aufwand als auch hinsichtlich der möglichen Fehlinterpretationen das Optimum zwischen manueller Nachmodellierung und vollautomatischer Konkretisierung dar (siehe Abbildung 4-8).

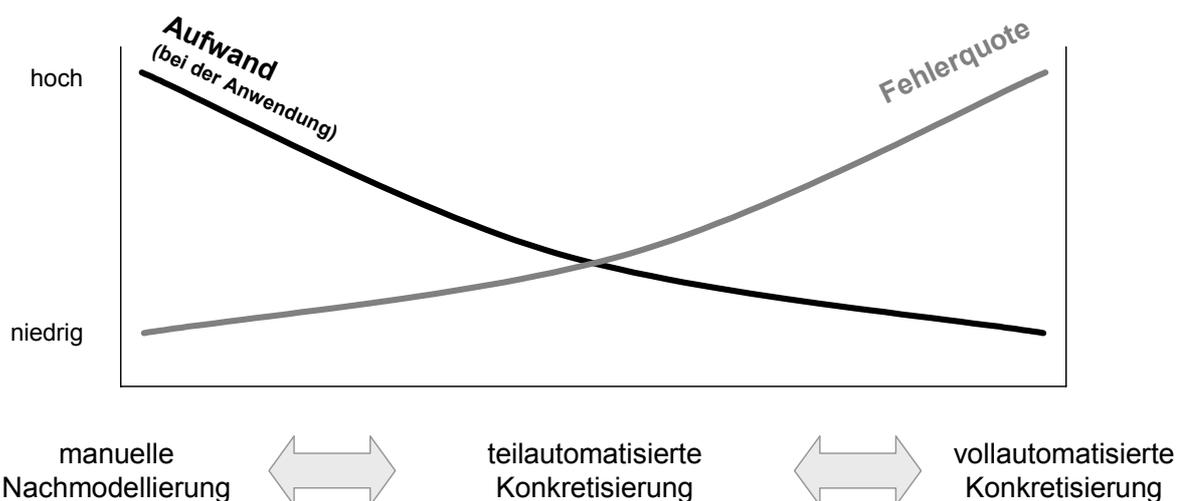


Abbildung 4-8: Aufwand und Fehlerquote bei unterschiedlich automatisierter Konkretisierung

Die algorithmischen Grundlagen zur Interpretation dreidimensionaler Skizzen als Basis für eine softwaregestützte Assistenz bei der Konkretisierung wurden im Rahmen einer Projekt-

studie erarbeitet [BRAUN 2004]. Eine Umsetzung der Konkretisierungsunterstützung in der Software des 3D-Skizzierers wurde noch nicht realisiert.

4.3 Ausblick auf mittel- und langfristig realisierbare Ideen

Neben den in den zwei vorangegangenen Teilkapiteln beschriebenen Konzepten wurden im Rahmen dieser Arbeit darüber hinaus gehende Ideen und Visionen zur Weiterentwicklung des 3D-Skizzierers erarbeitet, auf die im Folgenden eingegangen wird. Dabei handelt es sich um Themen, die aufgrund ihrer Komplexität oder aufgrund von Abhängigkeiten mit der Weiterentwicklung anderer Technologien erst im mittel- bis langfristigen Zeithorizont realisiert werden können.

Mittelfristig realisierbare Verbesserungen

Neben einer Optimierung des Bedienkonzepts gibt es weiteres Verbesserungspotenzial für die in Kapitel 3.2.3 beschriebene Software zum Anfertigen dreidimensionaler Skizzen. Ein wesentlicher Punkt in diesem Zusammenhang ist die Ergänzung der Funktionalität um Hilfsebenen. Mittels temporär einblendbarer Hilfsebenen können an beliebigen Stellen zweidimensionale Skizzen und Beschriftungen als Element der dreidimensionalen Skizze eingefügt werden. Derartige Beschriftungen können auch als virtuelle Post-Its²⁵ im Rahmen von Reviews dienen. Darüber hinaus ist anzustreben, die Software mit in CAD- und Grafikprogrammen etablierten Komfortfunktionen anzureichern. Dazu gehören ein Punktfang, die Möglichkeit, translatorische Verschiebungen auf einzelne Koordinatenachsen zu beschränken, die Möglichkeit, ausgewählte Objekte um definierte Winkel rotieren zu können sowie die Möglichkeit, Objekte aneinander auszurichten. Bei Einsatz eines Force-Feedback-Eingabegerätes können Hilfsebenen und bereits skizzierte Skizzenelemente fühlbar gemacht werden und ein Punktfang haptisch unterstützt werden. Dabei können sehr viele Parameter die darzustellende Kraft beeinflussen, beispielsweise sind bei einem haptischen Punktfang verschiedene Kennlinien für das Verhältnis zwischen der Entfernung zum Punkt und der auszuübenden Kraft denkbar. Geeignete Parametervorgaben müssen experimentell ermittelt werden. Ebenfalls im mittelfristigen Zeithorizont zu sehen ist eine Erweiterung des in Kapitel 4.1 beschriebenen Bedienkonzepts um Spracheingabe und -ausgabe.

²⁵ Der Begriff „Post-it“ wird als generalisierter Markenname verwendet und steht für Klebezettel bzw. Haftnotizen.

Verbesserung durch Weiterentwicklung unterstützender Technologien

Ein ausschlaggebender Punkt für die Realisierung eines erfolgreichen und intuitiv benutzbaren 3D-Skizzierers ist die Einbeziehung der Kopfposition des Benutzers in die Bildberechnung, auch Headtracking genannt. Dadurch wird das intuitive Verhalten, Gegenstände aus unterschiedlichen Blickwinkeln zu betrachten, unterstützt. Da eine Kombination von magnetischem Trackingsystem und Röhrenmonitor zu Interferenzen führt, muss mindestens auf einer Seite die Technologie gewechselt werden. Neue Technologien zur Generierung stereoskopischer Bilder würden hier ebenso einen Beitrag leisten wie verbesserte nicht-magnetische Trackingsysteme. Im Idealfall wird die Kopfposition optisch erfasst, ohne dafür Markierungen einzusetzen, die erst am Kopf des Benutzers angebracht werden müssten (markerloses Tracking).

Ein entscheidender Faktor für die zukünftige Verbreitung von 3D-Skizzierern sind die Kosten für Eingabegeräte und Trackingsysteme. Da es für derartige Systeme momentan keinen Massenmarkt gibt, betragen die Anschaffungskosten derzeit ein Vielfaches der restlichen Hardwarekosten, womit ein großer potenzieller Anwenderkreis ausgeschlossen wird. Ziel muss es daher sein, kostengünstige Eingabegeräte und Trackingsysteme zu entwickeln. Ein möglicher Ansatz, dieses Ziel zu erreichen, stellt das im Rahmen einer Konzeptstudie [ABICHT 2004] entwickelte Konzept eines low-cost Trackingsystems dar, das auf Infrarottechnologie basiert.

Verschmelzen von CAD und VR

Bei der in Kapitel 4.2 beschriebenen Konkretisierung dreidimensionaler Skizzen verschwimmt die Grenze zwischen Skizzier- und CAD-System. Je mehr exakte Geometrie im 3D-Skizziersystem definiert werden kann, ggf. unterstützt durch Konkretisierungsfunktionen, desto mehr Funktionalität von CAD-Systemen muss implementiert werden. Hierbei stellt sich die Frage, wie weit reichend die Integration von CAD-Funktionalität in ein VR-basiertes Skizzierwerkzeug gehen soll. Da Design und Konstruktion von Produkten zur Definition dreidimensionaler Geometriedaten führen, wäre es sinnvoll diese Tätigkeiten durchgängig auch mit 3D-Eingabe- und -Ausgabewerkzeugen durchzuführen. Dazu müssten CAD- und VR-Technologien zu einem neuen System verschmolzen werden. Dies kann entweder durch die Integration von CAD-Funktionalität in bestehende VR-Systeme erfolgen, oder durch die Erweiterung von CAD-Systemen um die Unterstützung von VR-Eingabe- und Ausgabegeräten. Durch die starke Etablierung von CAD-Systemen in den Unternehmen und deren Integration in EDM/PDM-Systeme ist der zweite Weg der wahrscheinlichere.

Zukünftige VR-CAD-Systeme erleichtern die Modellierung dreidimensionaler Geometrien und bieten gleichzeitig am Arbeitsplatz des Entwicklers/Konstrukteurs Visualisierungsmöglichkeiten, die bisher nur in speziellen VR-Installationen verfügbar sind. Durch die Integration von VR und CAD in ein einheitliches System werden Datenkonvertierungen überflüssig. Die momentan eingesetzten VR- und CAD-Systeme haben aufgrund unterschiedlicher Anforderungen inkompatible Datenformate. Während das VR-Modell zugunsten der Echtzeitfähigkeit Ungenauigkeiten bewusst zulässt, liegt der Fokus beim CAD-Modell auf einer mathematisch exakten, präzisen und damit fertigungsgerechten Geometriebeschreibung [ENCARNAÇÃO 2000]. Dieser Widerspruch muss bei der Entwicklung eines integrierten Systems aufgelöst werden, was durch die weiterhin nach dem Moore'schen Gesetz²⁶ steigende Rechnerleistung erleichtert wird.

Bei der Entwicklung eines integrierten VR-CAD-Datenmodells ist zusätzlich zu berücksichtigen, dass neben mathematisch exakt beschreibbaren Objekten auch unscharfe Geometrieinformationen in Form von hochaufgelösten Skizzen verwaltet werden. Bei einem derartigen hybriden Datenmodell bleiben die Skizzen, die Ausgangsbasis für das detaillierte Geometriemodell waren, erhalten und können bei Bedarf zusätzlich eingeblendet werden. Damit gehen keine in der Skizze festgehaltenen Informationen mehr verloren. Durch den hybriden Ansatz ist es auch möglich, bestehende im Vektorformat gespeicherte Modelle mit handskizzierten Ergänzungen zu versehen oder handschriftliche Anmerkungen zu machen. Weiterhin würde der Bedarf bestehen, unscharfe Skizzen in einem hochaufgelösten Format in exakte Geometrieinformationen weiterzuverarbeiten, allerdings nicht mehr über Systemgrenzen hinweg. Dazu können die in Kapitel 4.2 beschriebenen Konzepte zum Einsatz kommen. Aber auch ein direktes Nachmodellieren einer bestehenden 3D-Skizze ist auf diese Weise erheblich leichter zu bewerkstelligen als mit einem per 2D-Maus gesteuerten herkömmlichen CAD-System.

Ein zukünftiges integriertes VR-CAD-System wäre ein wirkliches 3D-CAD-System, da nicht nur die Datenverwaltung, sondern auch die Interaktion und Darstellung in 3D erfolgt. Durch entsprechende Bedienkonzepte würde eine intuitive Geometriemodellierung möglich werden, einschließlich einer erleichterten Änderbarkeit bereits vorhandener CAD-Modelle.

²⁶ 1965 von Gordon Moore postulierte Beobachtung, dass sich durch den technischen Fortschritt die Komplexität von integrierten Schaltkreisen alle 18 Monate verdoppelt [MOORE 1965]

Langfristig realisierbare Ideen und visionäre Anregungen zur Weiterentwicklung

Die nun im Folgenden beschriebenen Anregungen zur Weiterentwicklung des 3D-Skizzierers haben visionären Charakter und stellen somit mögliche langfristige Entwicklungsziele dar. Durch die Integration von Simulationswerkzeugen könnten beispielsweise Kinematikuntersuchungen bereits in frühen Phasen auf Basis von 3D-Skizzen durchgeführt werden. Weitere Anwendungsfälle wären überschlägige Auslegungsberechnungen oder Kollisionsuntersuchungen. Für eine Realisierung dieser Idee muss ein Weg gefunden werden, aus den unscharfen Geometrieinformationen der 3D-Skizze die für eine Berechnung relevanten Daten ohne aufwändige Benutzerinteraktion zu extrahieren.

Die Vision des „Tangible CAD“ [SPECKER & SACHSE 1999, WIRTH 2002], die eine Integration von physischen Modellen in den digitalen Modellierungsprozess anstrebt, bietet auch interessante Weiterentwicklungsmöglichkeiten für den 3D-Skizzierer. So könnten beispielsweise reale Modelle um virtuelle 3D-Skizzen ergänzt werden. Die virtuelle Skizze wird so mit dem realen Modell verknüpft, dass bei einer Bewegung des realen Modells innerhalb des Darstellungsraums die dazugehörige 3D-Skizze mitbewegt wird. Bei den physischen Modellen kann es sich z. B. um Vorgängerprodukte oder mit Rapid Prototyping hergestellte Teile handeln. Ein virtuelles Pendant ermöglicht die Weiterbearbeitung auch ohne die Notwendigkeit, das reale Teil halten und positionieren zu müssen. Um diese Vision zu realisieren, bedarf es einer leistungsfähigen Objekterkennung und berührungslos getrackten Eingabegeräten.

Im Gegensatz zur Digitalisierung und damit Virtualisierung realer Objekte ist es auch denkbar, physische Repräsentationen der zunächst nur virtuell existierenden 3D-Skizzen anzufertigen. Dazu bietet sich Rapid Prototyping als Technologie zur Generierung realer Modelle aus digitalen 3D-Modellen an. Auf diese Weise wäre es möglich, ein Pendant zur Möglichkeit des Ausdrucks zweidimensionaler digitaler Skizzen zu schaffen. Rapid Prototyping Modelle können allerdings nur aus zusammenhängenden Bereichen einer dreidimensionalen Skizze erzeugt werden, was beispielsweise Anmerkungen oder Bewegungspfeile ausschließt.

Statt der bisherigen Realisierung als Einzelarbeitsplatz könnten zukünftige Versionen die gleichzeitige Bearbeitung durch mehrere Personen unterstützen. Dies umfasst sowohl verteilte Teams, die über das Internet miteinander kommunizieren, als auch an einem Ort stattfindende Besprechungen und Reviews mit mindestens zwei Teilnehmern. Dabei sollte jedes Teammitglied bzw. jeder Teilnehmer nicht nur die Möglichkeit haben, 3D-Skizzen in Stereo zu betrachten, sondern auch gestaltend mitwirken können.

Anzustreben ist auch eine vollständige Integration des 3D-Skizzierers in bestehende und etablierte CAx-Prozessketten einschließlich der Verwaltung durch EDM/PDM-Systeme. Darüber hinaus sind die Ideen zum Ideenmanagement nach SCHWANKL [2002] einschließlich einer

Bewertungsfunktionalität auch auf die Verwaltung dreidimensionaler Ideenskizzen anwendbar.

4.4 Zusammenfassung

Die in diesem Kapitel vorgestellten Ansätze zur Weiterentwicklung werden in Abbildung 4-9 nochmals zusammenfassend übersichtlich dargestellt. Neben einer zeitlichen Ordnung hinsichtlich einer möglichen Realisierung wird zu jedem Ansatz auch eine kurze Statusinformation gegeben.

		Vorgestellter Ansatz	Status
Zeithorizont zur Realisierung	kurzfristig	zweihändiges Bedienkonzept mit grafischer Bedienoberfläche	Implementierbares Konzept
		Unterstützung des Konkretisierungsprozesses	Implementierbares Konzept
	mittelfristig	Hilfsebenen, Komfortfunktionen, Force Feedback und Sprachsteuerung	kurzfristige Realisierung scheitert an komplexer Implementierung
		neue Technologien	starke Abhängigkeit von Dritten, Konzeptstudie zu kostengünstigem Tracking
	langfristig	Verschmelzen von CAD und VR	starke Abhängigkeit von Interessen der CAD-Hersteller
		Mehrbenutzerfähigkeit	korrekte Darstellung für mehrere Betrachter an einem Display derzeit sehr unausgereift, Vernetzung mehrerer Displays möglich
	visionär	Physische Repräsentationen von 3D-Skizzen	mit heutigen Fertigungsverfahren nur stark eingeschränkt möglich
		Integration von Kinematikuntersuchungen und Auslegungsberechnungen	intensive Forschungsarbeit notwendig
Integration von physischen Modellen		intensive Forschungsarbeit notwendig	

Abbildung 4-9: Übersicht der Ansätze zur Weiterentwicklung

5 Zusammenfassung und Ausblick

Diese Arbeit befasst sich mit der Unterstützung der Geometriemodellierung in frühen Entwicklungsphasen durch intuitiv bedienbare digitale Werkzeuge. Motivation für die Beschäftigung mit diesem Thema ist die unzureichende Unterstützung früher, kreativer Phasen in der Produktentwicklung durch heutige Rechnerwerkzeuge zur Geometriemodellierung. Die häufige Verwendung von handgefertigten Papierskizzen vor und auch während des Einsatzes von CAD lässt auf Eigenschaften schließen, die CAD-Systeme nicht aufweisen. Ein digitales Werkzeug, das die Vorteile von Handskizzen mit denen von CAD-Systemen kombiniert, würde eine durchgängige digitale Prozesskette in der Produktentwicklung ermöglichen.

Eine detaillierte Recherche des aktuellen Standes der Forschung und der Technik bildet die Grundlage für die Entwicklung eines prototypischen Werkzeugs zur Erstellung digitaler dreidimensionaler Skizzen. Erkenntnisse aus der Psychologie über kreative Mechanismen beim Problemlösen geben Aufschlüsse über das mentale Modell vom zu entwickelnden Produkt in der Vorstellung des Entwicklers. Dieses Modell kann gleichzeitig Elemente in verschiedenen Abstraktions- bzw. Unschärfegraden enthalten, die bildlich oder begrifflich codiert sein können. Um die Einschränkungen durch die geringe Kapazität des Arbeitsgedächtnisses zu umgehen, stellen Papierskizzen trotz der Einschränkung durch ihre Zweidimensionalität ein gut geeignetes und dadurch häufig genutztes Medium zur Externalisierung des mentalen Modells während kreativer Problemlöseprozesse dar.

Neben den psychologischen Grundlagen wird auf existierende Rechnerwerkzeuge zur Geometriemodellierung und -visualisierung eingegangen. Ergänzend zu CAD-Systemen zur Modellierung kommen in Forschung und Industrie vermehrt Virtual- und Augmented-Reality-Installationen zur immersiven Visualisierung zum Einsatz. Die zugrunde liegenden Technologien, Bedienkonzepte und Datenmodelle werden ausführlich beschrieben. Weiterhin wird ein Überblick über in Forschungsprojekten realisierte Systeme zum digitalen Skizzieren und Modellieren in frühen Phasen gegeben. Auf Basis der Stärken und Schwächen der beschriebenen Systeme werden Anforderungen an zukünftige Werkzeuge identifiziert.

Ein im Rahmen dieser Arbeit auf Basis der identifizierten Anforderungen entwickeltes prototypisches Skizzierwerkzeug wird vorgestellt. Es ermöglicht die Erstellung dreidimensionaler linienbasierter Skizzen mit einem stiftbasierten Eingabewerkzeug. Durch eine immersive Stereo-Visualisierung der 3D-Skizze im Handlungsraum werden analog zur Papierskizze die erzeugten Linien am Ort ihres Entstehens angezeigt. Dies ermöglicht im Vergleich zu Konzepten mit getrenntem Handlungs- und Wahrnehmungsraum ein intuitiveres Arbeiten. Erfahrungen, die durch Versuche und Beobachtungen bei Systemdemonstrationen gewonnen wurden, zeigen Stärken und Schwächen des realisierten Ansatzes auf. Vorteilhaft gegenüber Pa-

perspektivischer Darstellungen. Eine 3D-Skizze kann beliebig im Raum gedreht werden und macht somit das Anfertigen verschiedener Darstellungen überflüssig. Als Optimierungspotenzial für zukünftige Weiterentwicklungen des prototypischen Skizzierwerkzeugs werden eine Vergrößerung des Arbeitsraums, zusätzliche Komfortfunktionen und die Einbeziehung der Kopfposition des Betrachters in die Bildberechnung identifiziert. Darüber hinaus werden die Grenzen des linienbasierten Ansatzes aufgezeigt: Körper mit gekrümmten Flächen können nicht ausschließlich durch ihre Kanten dargestellt werden. Eine Darstellung derartiger Flächen mit 3D-Linien ist aufwendig, nicht eindeutig und dadurch nicht intuitiv.

Basierend auf den gemachten Erfahrungen mit der prototypischen Umsetzung eines 3D-Skizzierwerkzeugs wird ein speziell an die Bedürfnisse der Geometriemodellierung in frühen Phasen angepasstes Bedienkonzept vorgestellt, das neben der Erzeugung linienbasierter 3D-Skizzen auch die Modellierung von einfachen Körpern mit gekrümmten Oberflächen ermöglicht. Für die Weiterverarbeitung dreidimensionaler Skizzen in einer digitalen Prozesskette wird ein Konzept zur Unterstützung des Konkretisierungsprozesses beschrieben, das es ermöglicht, Skizzier-, CAD- und Virtual-Reality-Systeme zukünftig zu einem einzigen immersiven Geometriemodellierungssystem zu integrieren.

Ein derartiges System besäße das Potenzial, die momentan getrennten Werkzeugwelten von Industriedesign und Ingenieurwesen zusammenzuführen und damit die Kommunikation zwischen diesen beiden Disziplinen zu verbessern. Allerdings müssen auf dem Weg zur Verwirklichung dieser Vision noch einige Hürden genommen werden. Trotz der bereits 1991 von Sachs formulierten Forderung nach „design directly in 3D“, also einer Modellierung dreidimensionaler Geometrien mit 3D-Eingabegeräten [SACHS ET AL. 1991], sind bis heute noch keine entsprechenden immersiven CAD-Systeme verfügbar. Dies liegt mit am Mangel an bezahlbarer und wirklich praxistauglicher Virtual-Reality-Hardware begründet: Autostereoskopische Displays, die hinsichtlich der Darstellungsqualität heutigen 2D-Displays ebenbürtig sind, würden als störend empfundene Brillen überflüssig machen. Einfach anzuschließende und intuitiv zu bedienende Eingabegeräte mit sechs Freiheitsgraden (drei translatorische und drei rotatorische) würden die heutige 2D-Maus ersetzen. Dies kann beispielsweise ein spezieller Stift sein, dessen Position und Orientierung im Raum optisch erfasst wird. Um mit Software zur Geometriemodellierung derartige Hardware nutzen zu können, müsste die Dreidimensionalität in den Bedienkonzepten durchgängig unterstützt werden. Auf diese Weise könnte das von Sachs geforderte neue Bedienparadigma Realität werden.

6 Literatur

ABICHT, F. (2004):

Entwicklung eines low-cost 3D-Trackingsystems.

München: TU, Lehrstuhl für Produktentwicklung, Unveröffentlichte Semesterarbeit 2004.

(Nr. 2061)

ALTSCHULER, G. (1986):

Erfinden - Wege zur Lösung technischer Probleme.

Berlin: Verlag Technik 1986.

AMFT, M. (2003):

Phasenübergreifende bidirektionale Integration von Gestaltung und Berechnung.

München: Dr. Hut 2003. (Produktentwicklung, Band 53)

Zugl. München: TU, Diss. 2002.

ANDERL, R. (1993):

CAD-Schnittstellen, Methoden und Werkzeuge zur CA-Integration.

München: Hanser 1993.

ARANGARASAN, R.; CHI-CHENG C.; DANI, T. H.; XIAOCHUN L.; GADH, R. (2000):

Geometric Modeling in Multi-Modal, Multi-Sensory Virtual Environment. In: Woo, T.; Altintas, Y. (Eds.): Proceedings of the 2000 NSF Design and Manufacturing Research Conference, Vancouver (Kanada), 03.-06.01.2000.

Arlington (USA): NSF 2000 (CD-ROM).

BADDELEY, A. (1997):

Human Memory: Theory and practice.

East Sussex (Großbritannien): Psychology Press 1997.

BOLTZ, A. (2002):

Was wo wie lange gespeichert wird.

Spektrum der Wissenschaft Spezial - Gedächtnis (2002) 1, S. 21.

BORMANN, S. (1994):

Virtual Reality: Genese und Evaluation.

Bonn: Addison-Wesley 1994.

BRAUN, S. (2004):

Konkretisierung dreidimensionaler Skizzen.

München: TU, Lehrstuhl für Produktentwicklung, Unveröffentlichte Semesterarbeit 2004.

(Nr. 2125)

BURDEA, G.; COIFFET, P. (2003):

Virtual Reality Technology. 2. Aufl.

New Jersey (New Jersey, USA): Wiley 2003.

BUTTERWORTH, J.; DAVIDSON, A.; HENCH, S.; OLANO, T. M. (1992):

3DM: A three dimensional modeler using a head mounted display. In: Levoy, M.; Catmull, E.; Zeltzer, D. (Eds.): Proceedings of the 1992 Symposium on Interactive 3D Graphics (SI3D 1992), Cambridge (Massachusetts, USA), 29.03.-01.04.1992.

New York (New York, USA): ACM Press 1992, S. 135-138.

CRAIK, F. I. M.; LOCKHART, R. S. (1972):

Levels of processing: A framework for memory research.

Journal of Verbal Learning and Verbal Behaviour 11 (1972), S. 671-684.

DAENZER, W. F., HUBER, F. (HRSG.) (2002):

Systems Engineering design methods: Strategies for product design.

Zürich (Schweiz): Industrielle Organisation 2002.

DEISINGER, J.; BLACH, R.; WESCHE G.; BREINING, R.; SIMON, A. (2000):

Towards Immersive Modelling – Challenges and Recommendations: A Workshop Analyzing the Needs of Designer. In: Mulder, J. D.; van Liere, R. (Eds.): Proceedings of the 6th Eurographics Workshop on Virtual Environments, Amsterdam (Niederlande), 01.-02.06.2000

Wien: Springer 2000 (S. 145-156).

DIEDRICH, O.; SIERING, P. (2003):

Zwischen Hype und Wirklichkeit.

c't Magazin für Computer Technik (2003) 6, S. 146-147.

DIEHL, H.; MÜLLER, F.; LINDEMANN, U. (2004):

From raw 3D-Sketches to exact CAD product models – Concept for an assistant-system. In:

Hughes, J. F.; Jorge, J. A. (Eds.): EUROGRAPHICS Workshop on Sketch-Based Interfaces and Modeling (SBM 2004), Grenoble (Frankreich), 30.-31.08.2004.

Aire-la-Ville (Schweiz): The Eurographics Association 2004, S.27-32.

DIN EN ISO 9241 (1996):

Ergonomische Anforderungen für Bürotätigkeiten mit Bildschirmgeräten – Teil 10: Grundsätze der Dialoggestaltung.

Berlin: Beuth 1996.

- DÖRNER, D.; KREUZIG, H. W.; REITHER, F.; STÄUDEL, T. (1983):
Lohhausen. Vom Umgang mit Unbestimmtheit und Komplexität.
Bern (Schweiz): Huber 1983.
- DÖRNER, D. (1987A):
Problemlösen als Informationsverarbeitung.
Stuttgart: Kohlhammer 1987.
- DÖRNER, D. (1987B):
Memory Systems and the Regulation of Behaviour. In: van der Meer, E.; Hoffmann, J. (Eds.):
Knowledge Aided Information Processing.
Amsterdam (Niederlande): North-Holland 1987.
- DÖRNER, D. (1995):
Problemlösen und Gedächtnis. In: Dörner, D.; van der Meer, E. (Hrsg.): Das Gedächtnis: Probleme - Trends - Perspektiven.
Göttingen: Hofgrebe 1995, S. 297-320.
- DÖRNER, D. (1999):
Bauplan für eine Seele.
Reinbeck: Rowohlt 1999.
- EHMANN, S. A.; GREGORY, A. S.; MING C. LIN (2001):
A touch-enabled system for multiresolution modeling and 3D painting.
The Journal of Visualization and Computer Animation 12 (2001) 3, S. 145-157.
- EHRENSPIEL, K. (2003):
Integrierte Produktentwicklung. 2. Aufl.
München: Hanser 2003.
- ENCARNAÇÃO, L. M.; BIMBER, O.; SCHMALSTIEG, D.; CHANDLER, S. D. (1999):
A Translucent Sketchpad for the Virtual Table Exploring Motion-based Gesture Recognition.
Computer Graphics Forum 18 (1999) 3, S. 277-285.
- ENCARNAÇÃO, L. M. (2000):
Virtuelle Realität - Perspektiven für den Einsatz in der Produktentstehung. In: Krause, F.-L.; Tang, T.; Ahle, U. (Hrsg.): Innovationsforum Virtuelle Produktentstehung - Vorträge / Proceedings, Berlin, 11.-12.05.2000.
Berlin: iViP 2000, S. 287-302.
- FERGUSON, E. S. (1993):
Das innere Auge - Von der Kunst des Ingenieurs.
Basel (Schweiz): Birkhäuser 1993.

- FORSBERG, A. S.; LA VIOLA JR., J. J.; ZELEZNIK, R. C. (1998):
ErgoDesk: A Framework for Two- and Three-Dimensional Interaction at the ActiveDesk. In: Cruz-Neira, C.; Riedel, O. (Eds.): Proceedings of the Second International Immersive Projection Technology Workshop (IPT 98). Ames (Iowa, USA) May 11-12.05.1998. Ames (Iowa, USA): Iowa State University 1998, S. 167-174 (CD-ROM).
- FRIEDRICH, W. (2000):
ARVIKA - Augmented Reality für Entwicklung, Produktion und Service. In: Krause, F.-L.; Tang, T.; Ahle, U. (Hrsg.): Innovationsforum Virtuelle Produktentstehung - Vorträge / Proceedings, Berlin, 11.-12.05.2000. Berlin: iViP 2000 S. 93-107.
- FRITSCH, A. (2002):
Entwicklung eines innovativen Staubsaugers auf Basis biologischer Vorbilder. München: TU, Lehrstuhl für Produktentwicklung, Unveröffentlichte Diplomarbeit 2002. (Nr. 929)
- GAAG, A. (2002):
Entwicklung eines 3D-Skizzierers. München: TU, Lehrstuhl für Produktentwicklung, Unveröffentlichte Semesterarbeit 2002. (Nr. 2004)
- GIBSON, W. (1984):
Neuromancer. München: Heyne 1984.
- GOLDSCHMIDT, G. (1999):
The backtalk of self-generated sketches. In: Gero, J.; Tversky, B. (Eds.): Visual and Spatial Reasoning in Design. Sydney (Australien): Key Centre of Design Computing and Cognition, University of Sydney 1999, S. 163-184.
- GRAF, H.; KOCH, M.; STORK, A.; BARSKI, O. (2004):
Cyberstilo© - Towards an Ergonomic and Aesthetic Wireless 3D-Pen. In: Fröhlich, B.; Kitamura, Y.; Bowman, D. (Eds.): Proceedings of the IEEE VR2004 Workshop "Beyond Wand and Glove Based Interaction", Chicago (Illinois, USA), 28.03.2004. Los Alamitos (Kalifornien, USA), IEEE Computer Society, S. 51-54.
- GRIBNAU, M. (1999):
Two-handed interaction in computer supported 3D conceptual modelling. Delft (Niederlande): Technische Universiteit, Ph.D. Thesis 1999.

GROSSMAN, T.; BALAKRISHNAN, R.; KURTENBACH, G.; FITZMAURICE, G. W.; KHAN, A.;
BUXTON, B. (2001):

Interaction Techniques for 3D Modeling on Large Displays. In: Hughes, J. F.; Séquin, C. H. (Eds.): Proceedings of the 2001 ACM Symposium on Interactive 3D Graphics (I3D 2001), Research Triangle Park (North Carolina, USA), 19.-21.03.2001.
New York (New York, USA): ACM Press 2001, S. 17-23.

HACKER, W.; SACHSE, P.; SCHRODA, F. (1998):

Design thinking - Possible ways to successful solutions in product development. In: Frankenberg, E.; Badke-Schaub, P.; Birkhofer, H. (Hrsg.): Designers - The Key to Successful Product Development.
Berlin: Springer 1998, S. 205-216

HACKER, W. (HRSG.) (2002):

Denken in der Produktentwicklung.
Zürich (Schweiz): Hampp 2002.

HAGENDORF, H. (1995):

Visuell-räumliche Repräsentationen und Gedächtnisleistungen. In: Dörner, D.; van der Meer, E. (Hrsg.): Das Gedächtnis: Probleme - Trends - Perspektiven.
Göttingen: Hofgrebe 1995, S. 169-197.

HARFENSTELLER, M. (2002):

Einsatz von Modellen bei der Entwicklung eines innovativen Rechnergehäuses.
München: TU, Lehrstuhl für Produktentwicklung, Unveröffentlichte Diplomarbeit 2002.
(Nr. 932)

HIRZINGER, G. (2000):

Von der Steuerkugel zur SPACE MOUSE.
Wessling: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt 2000.

HUSSY, W. (1984):

Denkpsychologie. Ein Lehrbuch.
Stuttgart: Kohlhammer 1984.

IGARASHI, T.; MATSUOKA, S.; TANAKA, H. (1999):

Teddy: A Sketching Interface for 3D Freeform Design. In: Waggenspack, W. (Ed.): Proceedings of the 26th International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH 99), Los Angeles (Kalifornien, USA), 08.-13.08.1999.
New York (New York, USA): ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co. 1999, S. 409-416.

IGARASHI T.; HUGES, F. J. (2001):

A Suggestive Interface for 3D Drawing. In: Marks, J.; Mynatt, E. D. (Eds.): Proceedings of the 14th annual ACM symposium on User interface software and technology (UIST 2001), Orlando (Florida, USA), 11.-14.11.2001.

New York (New York, USA), ACM Press 2001, S. 173-181.

IRLINGER, R. (1999):

Methoden und Werkzeuge zur nachvollziehbaren Dokumentation in der Produktentwicklung.

Aachen: Shaker 1999. (Konstruktionstechnik München, Band 31)

Zugl. München: TU, Diss. 1998.

JAFFARD, R. (2002):

Das facettenreiche Gedächtnis.

Spektrum der Wissenschaft Spezial - Gedächtnis (2002), S. 6-9.

KAIN, S. (2004):

Vergleich 2D- und 3D-Skizzieren.

München: TU, Lehrstuhl für Produktentwicklung, Unveröffentlichte Semesterarbeit 2004

(Nr. 2122)

KOBAYASHI, M.; ISHII, H. (1993):

ClearBoard: A Novel Shared Drawing Medium that Supports Gaze Awareness in Remote Collaboration.

IEICE Transactions on Communications, E76-B (1993) 6, S. 609-617.

KOCH, M.; MEERKAMM, H. (2003):

Universal function-structures in early design stages. In: Folkesson, A.; Gralén, K.; Norell, M.; Sellgren, U.: Proceedings of the 14th International Conference on Engineering Design (ICED 03), Stockholm (Schweden), 19.-21.08.2003.

Glasgow (Großbritannien): Design Society 2003, CD-ROM.

KRAUSE, F.-L.; BIAHMOU TCHEBETCHOU, A. R. (2002):

Styling with Deformable Tools. In: Gausemeier, J. (Hrsg.): 1. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung.

Paderborn: HNI 2002, S. 169-183. (HNI-Verlagsschriftenreihe Band 107)

KRAUSE, F.-L.; JANSEN, H.; KAUFMANN, U.; ZIEBEIL, P. (2000):

iViP - eine Initiative für die integrierte virtuelle Produktentstehung. In: Krause, F.-L.; Tang, T.; Ahle, U. (Hrsg.): Innovationsforum Virtuelle Produktentstehung - Vorträge / Proceedings, Berlin, 11.-12.05.2000

Berlin: iViP 2000, S. 81-92.

KUNZ, A.; MEIER, M. (2001):

Innovation at the Digital Product - The Use of the Virtual Reality in Product Development Processes. In: Culley, S.; Duffy, A.; McMahon, C.; Wallace, K. (Hrsg.): Proceedings of the 13th International Conference on Engineering Design (ICED 01), Glasgow (Großbritannien), 21.-23.08.2001
Glasgow (Großbritannien): I Mech E 2001, S. 693-700.

LANDWEHR, R. (1998):

Grundlagenerarbeitung zur Produktionseinführung von Reverse Engineering im Werk 010 der Daimler-Benz AG.
Karlsruhe: TU, Fakultät Maschinenbau, Diplomarbeit 1998.

LINDEMANN, U. (2005):

Methodische Entwicklung Technischer Produkte.
Berlin: Springer 2005.

LINDEN, A.; FENN, J. (2003):

Understanding Gartner's Hype Cycles. Strategic Analysis Report R-20-1971.
Stamford (Connecticut, USA): Gartner Research 2003.

LIPSON, H. (1998):

Computer Aided 3D Sketching for Conceptual Design.
Haifa (Israel): Israel Institute of Technology, Ph.D. Thesis 1998.

LÜDDEMANN, J. (1996):

Virtuelle Tonmodellierung zur skizzierenden Formgestaltung im Industriedesign.
Berlin: TU, Diss. 1996.

MILGRAM, P.; KISHINO, F. (1994):

A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays.
IEICE Transactions on Information and Systems, Special issue on Networked Reality, E77-D (1994) 12, S. 1321-1329.

MILLER, G. A. (1956):

The Magical Number Seven, Plus or Minus Two: Some Limits on our Capacity for Processing Information.
Psychological Review 63 (1956), S. 81-97.

MIN, P. (2004):

A 3D Model Search Engine.
Princeton (New Jersey, USA): Princeton University, Ph.D. Thesis 2004.

MOORE, G. E. (1965):

Cramming more components onto integrated circuits.
Electronics Magazine 38 (1965) 8, S. 114-117.

MÜLLER, F.; LEX, S.; BRIEGEL, C.; LINDEMANN, U. (2004):

An Innovative User Interface for Intuitive 3D-Sketching in an Augmented Reality Environment.
In: Marjanović, D. (Hrsg.): Proceedings of the 8th International Design Conference (DESIGN 2004), Dubrovnik (Kroatien), 17.-20.05.2004.
Zagreb (Kroatien): Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture 2004, S. 793-798.

MÜLLER, F.; PACHE, M.; SCHNEIDER, S.; LINDEMANN, U. (2003):

Free-Hand Sketching for Creative Work in Early Design Phases. In: Bártolo, P. J.; Mitchell, G. (Hrsg.): Proceedings of the 1st International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping (vr@p 2003), Leiria (Portugal), 01.-04.10.2003.
Leiria (Portugal): Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Leiria 2003, S. 305-311.

OH J.-Y. , STUERZLINGER W. (2003):

Intelligent Manipulation Techniques for Conceptual 3D Design. In: Rauterberg, M.; Menozzi, M.; Wesson, J. (Eds.): Proceedings of the 9th IFIP TC13 International Conference on Human-Computer Interaction (INTERACT '03), Zürich (Schweiz), 01.-05.09.2003.
Zürich (Schweiz): IOS Press 2003, S. 319-326.

PACHE, M.; WEIBHAHN, G.; RÖMER, A.; LINDEMANN, U.; HACKER, W. (1999):

Effort-saving modeling in early stages of the design process. In: Lindemann, U.; Birkhofer, H.; Meerkamm, H.; Vajna, S. (Eds.): Proceedings of the 12th International Conference on Engineering Design (ICED 99), Garching b. München, 24.-26.08.1999.
München: TU 1999, S. 679-684. (Schriftenreihe WDK 26)

PACHE, M.; RÖMER, A.; LINDEMANN, U.; HACKER, W. (2001A):

Re-interpretation of Conceptual Design Sketches in Mechanical Engineering. In: Lee, D. E.; Crawford, R. H. (Eds.): Proceedings of the 2001 ASME Design Engineering Technical Conferences (DETC 2001): 21st Computers and Information in Engineering Conference (CIE), Pittsburgh (Pennsylvania, USA), 09.-12.09.2001.
New York (New York, USA): ASME 2001 (CD-ROM).

PACHE, M.; LINDEMANN, U.; RÖMER, A.; HACKER, W. (2001B):

Skizzieren mit dem CAD-System?
CAD-CAM Report 20 (2001) 3, S. 98-103.

PACHE, M.; LINDEMANN, U. (2003):

Sketching in 3D - What should Future Tools for Conceptual Design look like? In: Lindemann, U. (Hrsg.): Human Behaviour in Design.
Berlin: Springer 2003, S. 243-252.

PAHL, G.; BEITZ, W.; FELDHUSEN, J.; GROTE, K.-H. (2005):

Konstruktionslehre - Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung. Methoden und Anwendungen. 6. Aufl.
Berlin: Springer 2005.

PENTLAND, A. P. (1987):

Toward an Ideal 3D CAD System
Image Understanding an the Man-Machine-Interface 758 (1987)

PEREIRA, J. P.; JORGE, J.A.; BRANCO, V.; NUNES FERREIRA, F. (2000):

Towards Calligraphic Interfaces: Sketching 3D Scenes with Gestures and Context Icons. In: Magnenat-Thalmann, N.; Skala, V. (Hrsg.): Proceedings of the 8th International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Interactive Digital Media (WSCG 2000), Pilsen (Tschechische Republik), 07.-11.02.2000.
Pilsen (Tschechische Republik): University of West Bohemia 2000.

PIMENTEL, K.; TEIXEIRA., K. (1994):

Virtual Reality: Through the New Looking Glass. 2nd Edition.
New York (New York, USA): McGraw-Hill 1994.

REITER, A. (2003):

Einsatzszenarien für den 3D-Skizzierer.
München: TU, Lehrstuhl für Produktentwicklung, Unveröffentlichte Semesterarbeit 2003.
(Nr. 2056)

REITHER, F. (1979):

Über die Selbstreflexion beim Problemlösen.
Gießen: Univ., Diss. 1979.

RHEINGOLD, H. (1992):

Virtuelle Welten - Reisen im Cyberspace.
Reinbeck: Rowohlt 1992.

RÖMER, A.; PACHE, M.; WEIBHAHN, G.; LINDEMANN, U.; HACKER, W. (2001):

Effort-Saving Product Representations in Design - Results of a Questionnaire Survey.
Design Studies 22 (2001) 6.

- ROTH, K. (2000):
Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. Band. 1: Konstruktionslehre. 3. Aufl.
Berlin: Springer 2000.
- SACHS, E.; ROBERTS, A.; STOOPS, D. (1991):
3-Draw: A Tool for Designing 3D Shapes.
IEEE Computer Graphics and Applications 11 (1991) 6, S. 18-26.
- SACHSE, P.; HACKER, W.; LEINERT, S.; RIEMER, S. (1999):
Prototyping als Unterstützungsmöglichkeit des Denken und Handelns beim Konstruieren.
Zeitschrift für Arbeits- und Organisationspsychologie 43 (1999) 2, S. 71-82.
- SCHAUB, H. (1996):
Künstliche Seelen - Die Modellierung psychischer Prozesse.
Widerspruch - Münchner Zeitschrift für Philosophie 29 (1996)
- SCHKOLNE, S.; PRUETT, M.; SCHRÖDER, P. (2001):
Surface drawing: creating organic 3D shapes with the hand and tangible tools. In: Jacko, J.;
Sears, A. (Hrsg.): Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems 2001, Seattle (USA), 31.03.-05.04.2001.
New York (New York, USA): ACM Press 2001, S. 261-268.
- SCHMALSTIEG, D.; FUHRMANN, A.; SZALAVÁRI, Z.; GERVAUTZ, M. (1998):
Studierstube - An Environment for Collaboration in Augmented Reality.
Virtual Reality - Systems, Development and Applications 3 (1998) 1, S. 37-49.
- SCHMANDT, C. M. (1983):
Spatial Input/Display Correspondence in a Stereoscopic Computer Graphic Work Station.
ACM SIGGRAPH Computer Graphics 17 (1983) 3, S. 253-261.
- SCHNEIDER, J.; JUNG, M. (2003):
Optimierung eines 3D-Skizzierers.
München: TU, Lehrstuhl für Produktentwicklung, Unveröffentlichte Team-Semesterarbeit 2003
(Nr. 2011 und Nr. 2012)
- SCHÖNFELDER, R. (2004):
VRIB – The Virtual Reality Interaction Toolkit. In: Proceedings of the Virtual and Augmented
Reality International Status Conference 2004, Leipzig, 19.-20.02.2004.
Berlin: Bundesministerium für Bildung und Forschung 2004 (CD-ROM).
- SCHERMER, F. J. (1998):
Lernen und Gedächtnis.
Stuttgart: Kohlhammer 1998.

SCHWANKL, L. (2002):

Analyse und Dokumentation in der Produktentwicklung.
München: Dr. Hut 2002. (Produktentwicklung München, Band 49)
Zugl. München: TU, Diss. 2002.

SCHWENTNER, N. (2004):

Vergleich 2D- und 3D-Skizzieren.
München: TU, Lehrstuhl für Produktentwicklung, Unveröffentlichte Semesterarbeit 2004.
(Nr. 2123)

SEIFERT, K. (2002):

Evaluation multimodaler Computer-Systeme in frühen Entwicklungsphasen.
Berlin: TU, Diss. 2002.

SPECKER, A.; SACHSE, P. (1999):

Design Thinking - Analyse und Unterstützung konstruktiver Entwurfstätigkeiten.
Zürich (Schweiz): vdf Hochschulverlag 1999.

SPUR, G.; KRAUSE, F.-L. (1997):

Das virtuelle Produkt.
München: Hanser 1997.

STORK, A. (2003):

SketchAR - collaborative, immersive free form modelling in virtual and mixed realities.
COMPUTER GRAPHIK topics 15 (2003) 1, S. 15-16.

SUTHERLAND, I. E. (1963):

Sketchpad, a man machine graphical communication system.
Cambridge (USA): M.I.T., Ph.D. Thesis 1963.

SUTHERLAND, I. E. (1965):

The Ultimate Display.
Proceedings of the International Federation of Information Processing (IFIP) Congress (IFIP) 2
(1965), S. 506-508.

SUTHERLAND, I. E. (1968):

A Head-Mounted Three-Dimensional Display.
Proceedings of the AFIPS Fall Joint Computer Conference 33 (1968), S 757-764.

SZALAVÁRI, Z. (1999):

The Personal Interaction Panel - a two-handed Interface for Augmented Reality.
Wien (Österreich): TU, Diss. 1999.

TENZER, E. (2004):

Schweigen ist Silber, Reden ist Gold.
Bild der Wissenschaft 8/2004, S. 76.

THURNER, C. (2004):

Analyse der Konkretisierung von Skizzen am Beispiel der Entwicklung eines Motorrad-Instrumententrägers.
München: TU, Lehrstuhl für Produktentwicklung, Unveröffentlichte Semesterarbeit 2004.
(Nr. 2087)

VAHL, M.; VON LUKAS, U. (2003):

Integration of CAD and Virtual Reality based on OMG's CAD Services Interface. In: Baake, U.; Herbst, J.; Graessler, I. (Hrsg.): Proceedings of the 10th European Concurrent Engineering Conference, Plymouth (Großbritannien), 14.-16.04.2003.
Gent (Belgien): EUROSIS 2003, S. 54-61.

VDI-RICHTINIE 2221 (1993):

Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte.
Berlin: Beuth 1993.

WARE, C.; JESSOME, D. R. (1988):

Using the Bat: A Six-Dimensional Mouse for Object Placement.
IEEE Computer Graphics and Applications 8 (1988) 6, S. 65-70.

WELLER, F. (2000):

Geometrische Algorithmen in der Flächenrückführung.
Dortmund: Univ., Diss. 2000.

WESCHE, G.; GÖBEL, M.; PETERS, S. (2001):

FreeDrawer - Designunterstützung in immersiven Umgebungen. In: Tagungsband zum Praxisforum „Virtual Reality - Instrumente des Erfolgs“, Aachen, 15.11.2001.
Aachen: Fraunhofer IPT 2001.

WIRTH, J. (2000):

Rapid Modelling - Gegenständliches CAD für die begreifbare Produktgestaltung.
München: Hanser 2002.

WULF, J. (2002):

Elementarmethoden zur Lösungssuche.
München: Dr. Hut 2002. (Produktentwicklung München, Band 50)
Zugl. München: TU, Diss. 2002.

ZELEZNIK, R. C.; HENDRON, K. P.; HUGHES, J. F. (1996):

SKETCH: An Interface for Sketching 3D Scenes. In: Proceedings of the 23rd International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH 96), New Orleans (USA), 04.-09.08.1996.

New York (New York, USA): ACM Press 1996, S. 163-170.

ZIEGLER, B.:

Der richtige Weg zum CAD-Archiv.

AUTOCAD Magazin 8 (1995) 2.

7 Abkürzungsverzeichnis

2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
AR	Augmented Reality
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
B-Rep	Boundary Representation
CAD	Computer Aided Design
CAID	Computer Aided Industrial Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CAVE	Cave Automated Virtual Environment
CFD	Computational Fluid Dynamics
CSG	Constructive Solid Geometry
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
E-CAD	CAD-System zum Entwurf elektronischer Schaltungen
EDM	Engineering Data Management
FEM	Finite-Elemente-Methode
HMD	Head Mounted Display
IGES	Initial Graphics Exchange Specification
LCD	Liquid Crystal Display
M-CAD	CAD-System zum Entwurf mechanischer Systeme
MKS	Mehrkörpersimulation
MR	Mixed Reality
MVM	Münchner Vorgehensmodell
NURBS	Non Uniform, Rational B-Splines
PC	Personal Computer
PDA	Personal Digital Assistant
PDM	Produktdatenmanagement
SDK	Software Development Kit
STEP	STandard for the Exchange of Product data
TFT	Thin-Film Transistor
VDA-FS	Verband der Automobilindustrie - Flächenschnittstelle
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VR	Virtual Reality
VRML	Virtual Reality Markup Language
WIMP	Windows Icons Menus Pointer

8 Anhang

Fragebogen für Teilnehmer der Fallstudien [KAIN 2004, SCHWENTNER 2004]

8.1 Fragebogen 1. Teil (vor der Versuchsdurchführung)

Name, Alter:

Ich akzeptiere die Teilnahmebedingungen (siehe Beiblatt) mit meiner Unterschrift:

Welche Ausbildung haben Sie?

Wieviel Berufserfahrung besitzen Sie in Semestern ausgedrückt?

Wieviel Erfahrung haben Sie mit CAD-Programmen?

Haben Sie schon einmal von dem 3D-Skizzierer gehört?

Haben Sie schon mal damit gearbeitet?

Halten Sie sich für einen guten Zeichner (Papier und Stift) bzw. Skizzierer?

Welche Erwartung haben Sie an den 3D-Skizzierer?

Wie könnte Ihrer Meinung nach der 3D-Skizzierer aussehen? (keine technische Beschreibung)

Teilnehmernummer:

(Datum, Unterschrift)

Sehr viel viel wenig gar keine

ja nein

ja , und zwar _____ Stunden nein

ja, sehr eher schon eher nicht gar nicht

8.2 Fragebogen 2. Teil (nach der Versuchsdurchführung)

Name:

Beantworten Sie hier Fragen zu den 2D Aufgaben

Welche Aufgabe bearbeiteten Sie 2D? Schlitten Cocktail

Wie lange haben Sie nach Ihrer Meinung ca. für die Skizze gebraucht?

Fanden Sie die Aufgabe schwierig? superschwer schwer leicht superleicht

Haben Sie bei der Bearbeitung dieser Aufgabe viel radiert (korrigiert)? sehr viel viel wenig nie

Haben Sie die Bearbeitung der Aufgabe in 2D als hilfreich empfunden? (vgl 3d) sehr eher schon eher nicht gar nicht

Hat Ihnen die Bearbeitung der Aufgabe Spaß gemacht? sehr eher schon eher nicht gar nicht

Wie würden Sie mit Ihrer gerade erworbenen Erfahrung die Aufgaben jetzt lösen? wieder 2D jetzt besser in 3D

Fühlten Sie sich beim 2D-Skizzieren eingeschränkt durch:

mangelnde Darstellung verdeckter Linien? ja, sehr eher schon eher nicht gar nicht

Notwendigkeit mehrerer Ansichten? ja, sehr eher schon eher nicht gar nicht

Mangelnde (Keine Vorschläge) Tiefe? ja, sehr eher schon eher nicht gar nicht

Welche Mängel fallen Ihnen noch beim 2D-Skizzieren ein?

Beantworten Sie hier Fragen zu den 3D Aufgaben

Welche Aufgabe bearbeiteten Sie 3D? Schlitten Cocktail

Wie lange haben Sie nach Ihrer Meinung ca. für die Skizze gebraucht?

Fanden Sie die Aufgabe schwierig? superschwer schwer leicht superleicht

Haben Sie bei der Bearbeitung dieser Aufgabe viel radiert (korrigiert)? sehr viel viel wenig nie

Haben Sie die Bearbeitung der Aufgabe in 3D als hilfreich empfunden? (vgl 2D) sehr eher schon eher nicht gar nicht

Hat Ihnen die Bearbeitung der Aufgabe Spaß gemacht? sehr eher schon eher nicht gar nicht

Wie würden Sie mit Ihrer gerade erworbenen Erfahrung die Aufgaben jetzt lösen? wieder 3d jetzt besser in 2d

Halten Sie das 3D-Skizzieren für sinnvoll?

(verglichen mit herkömmlichem Stift und Papier) sinnvoll eher ja eher nein gar nicht

Beurteilen Sie, wie hilfreich die folgenden Werkzeuge Ihrer Meinung nach sind

Cursorsymbol ein/ausblende	sehr hilfreich <input type="checkbox"/>	eher schon <input type="checkbox"/>	eher nicht <input type="checkbox"/>	nutzlos <input type="checkbox"/>
Linien zeichnen	sehr hilfreich <input type="checkbox"/>	eher schon <input type="checkbox"/>	eher nicht <input type="checkbox"/>	nutzlos <input type="checkbox"/>
Radieren	sehr hilfreich <input type="checkbox"/>	eher schon <input type="checkbox"/>	eher nicht <input type="checkbox"/>	nutzlos <input type="checkbox"/>
Löschen ganzer Linienzüge	sehr hilfreich <input type="checkbox"/>	eher schon <input type="checkbox"/>	eher nicht <input type="checkbox"/>	nutzlos <input type="checkbox"/>
gesamte Skizze löschen	sehr hilfreich <input type="checkbox"/>	eher schon <input type="checkbox"/>	eher nicht <input type="checkbox"/>	nutzlos <input type="checkbox"/>
Linienstück umfärben	sehr hilfreich <input type="checkbox"/>	eher schon <input type="checkbox"/>	eher nicht <input type="checkbox"/>	nutzlos <input type="checkbox"/>
Skizze verkleinern	sehr hilfreich <input type="checkbox"/>	eher schon <input type="checkbox"/>	eher nicht <input type="checkbox"/>	nutzlos <input type="checkbox"/>
Skizze vergrößern	sehr hilfreich <input type="checkbox"/>	eher schon <input type="checkbox"/>	eher nicht <input type="checkbox"/>	nutzlos <input type="checkbox"/>
Verschieben der gesamten Skizze: translatorisch	sehr hilfreich <input type="checkbox"/>	eher schon <input type="checkbox"/>	eher nicht <input type="checkbox"/>	nutzlos <input type="checkbox"/>
Verschieben der gesamten Skizze: rotatorisch	sehr hilfreich <input type="checkbox"/>	eher schon <input type="checkbox"/>	eher nicht <input type="checkbox"/>	nutzlos <input type="checkbox"/>
Raumgitter anzeigen	sehr hilfreich <input type="checkbox"/>	eher schon <input type="checkbox"/>	eher nicht <input type="checkbox"/>	nutzlos <input type="checkbox"/>
Menü anzeigen	sehr hilfreich <input type="checkbox"/>	eher schon <input type="checkbox"/>	eher nicht <input type="checkbox"/>	nutzlos <input type="checkbox"/>

Benennen Sie, wie oft sie die Werkzeuge benutzen!

Cursorsymbol ein/ausblende	sehr oft <input type="checkbox"/>	oft <input type="checkbox"/>	selten <input type="checkbox"/>	nie <input type="checkbox"/>
Linien zeichnen	sehr oft <input type="checkbox"/>	oft <input type="checkbox"/>	selten <input type="checkbox"/>	nie <input type="checkbox"/>
Radieren	sehr oft <input type="checkbox"/>	oft <input type="checkbox"/>	selten <input type="checkbox"/>	nie <input type="checkbox"/>
Löschen ganzer Linienzüge	sehr oft <input type="checkbox"/>	oft <input type="checkbox"/>	selten <input type="checkbox"/>	nie <input type="checkbox"/>
gesamte Skizze löschen	sehr oft <input type="checkbox"/>	oft <input type="checkbox"/>	selten <input type="checkbox"/>	nie <input type="checkbox"/>
Linienstück umfärben	sehr oft <input type="checkbox"/>	oft <input type="checkbox"/>	selten <input type="checkbox"/>	nie <input type="checkbox"/>
Skizze verkleinern	sehr oft <input type="checkbox"/>	oft <input type="checkbox"/>	selten <input type="checkbox"/>	nie <input type="checkbox"/>
Skizze vergrößern	sehr oft <input type="checkbox"/>	oft <input type="checkbox"/>	selten <input type="checkbox"/>	nie <input type="checkbox"/>
Verschieben der gesamten Skizze: translatorisch	sehr oft <input type="checkbox"/>	oft <input type="checkbox"/>	selten <input type="checkbox"/>	nie <input type="checkbox"/>
Verschieben der gesamten Skizze: rotatorisch	sehr oft <input type="checkbox"/>	oft <input type="checkbox"/>	selten <input type="checkbox"/>	nie <input type="checkbox"/>
Raumgitter anzeigen	sehr oft <input type="checkbox"/>	oft <input type="checkbox"/>	selten <input type="checkbox"/>	nie <input type="checkbox"/>
Menü anzeigen	sehr oft <input type="checkbox"/>	oft <input type="checkbox"/>	selten <input type="checkbox"/>	nie <input type="checkbox"/>

Fanden Sie die Arbeit mit dem 3d Skizzierer am Bildschirm angenehm?

sehr eher schon eher nicht gar nicht

Fanden Sie die Bearbeitung der Aufgabe sinnvoll (praxisrelevant)?

sehr eher schon eher nicht gar nicht

Denken Sie, dass der 3D-Skizzierer das 2DSkizzieren ersetzen kann?

sicher glaub schon na ja niemals

Gut am 2D Skizzieren finde ich

Schlecht am 2D Skizzieren finde ich

Gut am 3D Skizzieren finde ich

Schlecht am 3D Skizzieren finde ich

Was würden Sie beim 3Dskizzierer verbessern?

9 Dissertationsverzeichnis des Lehrstuhls für Produktentwicklung

Lehrstuhl für Produktentwicklung

Technische Universität München, Boltzmannstraße 15, 85748 Garching

Dissertationen betreut von

- Prof. Dr.-Ing. W. Rodenacker,
- Prof. Dr.-Ing. K. Ehrlenspiel und
- Prof. Dr.-Ing. U. Lindemann

D1 COLLIN, H.:

Entwicklung eines Einwalzenkalenders nach einer systematischen Konstruktionsmethode.
München: TU, Diss. 1969.

D2 OTT, J.:

Untersuchungen und Vorrichtungen zum Offen-End-Spinnen.
München: TU, Diss. 1971.

D3 STEINWACHS, H.:

Informationsgewinnung an bandförmigen Produkten für die Konstruktion der Produktmaschine.
München: TU, Diss. 1971.

D4 SCHMETTOW, D.:

Entwicklung eines Rehabilitationsgerätes für Schwerstkörperbehinderte.
München: TU, Diss. 1972.

D5 LUBITZSCH, W.:

Die Entwicklung eines Maschinensystems zur Verarbeitung von chemischen Endlosfasern.
München: TU, Diss. 1974.

D6 SCHEITENBERGER, H.:

Entwurf und Optimierung eines Getriebesystems für einen Rotationsquerschneider mit allgemeingültigen Methoden.
München: TU, Diss. 1974.

- D7 BAUMGARTH, R.:
Die Vereinfachung von Geräten zur Konstanthaltung physikalischer Größen.
München: TU, Diss. 1976.
- D8 MAUDERER, E.:
Beitrag zum konstruktionsmethodischen Vorgehen durchgeführt am Beispiel eines Hochleistungsschalter-Antriebs.
München: TU, Diss. 1976.
- D9 SCHÄFER, J.:
Die Anwendung des methodischen Konstruierens auf verfahrenstechnische Aufgabenstellungen.
München: TU, Diss. 1977.
- D10 WEBER, J.:
Extruder mit Feststoffpumpe – Ein Beitrag zum Methodischen Konstruieren.
München: TU, Diss. 1978.
- D11 HEISIG, R.:
Längencodierer mit Hilfsbewegung.
München: TU, Diss. 1979.
- D12 KIEWERT, A.:
Systematische Erarbeitung von Hilfsmitteln zum kostenarmen Konstruieren.
München: TU, Diss. 1979.
- D13 LINDEMANN, U.:
Systemtechnische Betrachtung des Konstruktionsprozesses unter besonderer Berücksichtigung der Herstellkostenbeeinflussung beim Festlegen der Gestalt.
Düsseldorf: VDI-Verlag 1980. (Fortschritt-Berichte der VDI-Zeitschriften Reihe 1, Nr. 60)
Zugl. München: TU, Diss. 1980.
- D14 NJOYA, G.:
Untersuchungen zur Kinematik im Wälzlager bei synchron umlaufenden Innen- und Außenringen.
Hannover: Universität, Diss. 1980.
- D15 HENKEL, G.:
Theoretische und experimentelle Untersuchungen ebener konzentrisch gewellter Kreisringmembranen.
Hannover: Universität, Diss. 1980.

- D16 BALKEN, J.:
Systematische Entwicklung von Gleichlaufgelenken.
München: TU, Diss. 1981.
- D17 PETRA, H.:
Systematik, Erweiterung und Einschränkung von Lastausgleichslösungen für Standgetriebe mit zwei Leistungswegen – Ein Beitrag zum methodischen Konstruieren.
München: TU, Diss. 1981.
- D18 BAUMANN, G.:
Ein Kosteninformationssystem für die Gestaltungsphase im Betriebsmittelbau.
München: TU, Diss. 1982.
- D19 FISCHER, D.:
Kostenanalyse von Stirnzahnradern. Erarbeitung und Vergleich von Hilfsmitteln zur Kostenfrüherkennung.
München: TU, Diss. 1983.
- D20 AUGUSTIN, W.:
Sicherheitstechnik und Konstruktionsmethodiken - Sicherheitsgerechtes Konstruieren.
Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz 1985.
Zugl. München: TU, Diss. 1984.
- D21 RUTZ, A.:
Konstruieren als gedanklicher Prozeß.
München: TU, Diss. 1985.
- D22 SAUERMAN, H. J.:
Eine Produktkostenplanung für Unternehmen des Maschinenbaues.
München: TU, Diss. 1986.
- D23 HAFNER, J.:
Entscheidungshilfen für das kostengünstige Konstruieren von Schweiß- und Gußgehäusen.
München: TU, Diss. 1987.
- D24 JOHN, T.:
Systematische Entwicklung von homokinetischen Wellenkupplungen.
München: TU, Diss. 1987.

- D25 FIGEL, K.:
Optimieren beim Konstruieren.
München: Hanser 1988.
Zugl. München: TU, Diss. 1988 u. d. T.: Figel, K.: Integration automatisierter Optimierungsverfahren in den rechnerunterstützten Konstruktionsprozeß.

Reihe Konstruktionstechnik München

- D26 TROPSCHUH, P. F.:
Rechnerunterstützung für das Projektieren mit Hilfe eines wissensbasierten Systems.
München: Hanser 1989. (Konstruktionstechnik München, Band 1)
Zugl. München: TU, Diss. 1988 u. d. T.: Tropschuh, P. F.: Rechnerunterstützung für das Projektieren am Beispiel Schiffsgetriebe.
- D27 PICKEL, H.:
Kostenmodelle als Hilfsmittel zum Kostengünstigen Konstruieren.
München: Hanser 1989. (Konstruktionstechnik München, Band 2)
Zugl. München: TU, Diss. 1988.
- D28 KITTSTEINER, H.-J.:
Die Auswahl und Gestaltung von kostengünstigen Welle-Nabe-Verbindungen.
München: Hanser 1990. (Konstruktionstechnik München, Band 3)
Zugl. München: TU, Diss. 1989.
- D29 HILLEBRAND, A.:
Ein Kosteninformationssystem für die Neukonstruktion mit der Möglichkeit zum Anschluß an ein CAD-System.
München: Hanser 1991. (Konstruktionstechnik München, Band 4)
Zugl. München: TU, Diss. 1990.
- D30 DYLLA, N.:
Denk- und Handlungsabläufe beim Konstruieren.
München: Hanser 1991. (Konstruktionstechnik München, Band 5)
Zugl. München: TU, Diss. 1990.
- D31 MÜLLER, R.:
Datenbankgestützte Teilverwaltung und Wiederholteilsuche.
München: Hanser 1991. (Konstruktionstechnik München, Band 6)
Zugl. München: TU, Diss. 1990.

- D32 NEESE, J.:
Methodik einer wissensbasierten Schadenanalyse am Beispiel Wälzlagerungen.
München: Hanser 1991. (Konstruktionstechnik München, Band 7)
Zugl. München: TU, Diss. 1991.
- D33 SCHAAL, S.:
Integrierte Wissensverarbeitung mit CAD – Am Beispiel der konstruktionsbegleitenden Kalkulation.
München: Hanser 1992. (Konstruktionstechnik München, Band 8)
Zugl. München: TU, Diss. 1991.
- D34 BRAUNSPERGER, M.:
Qualitätssicherung im Entwicklungsablauf – Konzept einer präventiven Qualitätssicherung für die Automobilindustrie.
München: Hanser 1993. (Konstruktionstechnik München, Band 9)
Zugl. München: TU, Diss. 1992.
- D35 FEICHTER, E.:
Systematischer Entwicklungsprozeß am Beispiel von elastischen Radialversatzkupplungen.
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 10)
Zugl. München: TU, Diss. 1992.
- D36 WEINBRENNER, V.:
Produktlogik als Hilfsmittel zum Automatisieren von Varianten- und Anpassungskonstruktionen.
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 11)
Zugl. München: TU, Diss. 1993.
- D37 WACH, J. J.:
Problemspezifische Hilfsmittel für die Integrierte Produktentwicklung.
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 12)
Zugl. München: TU, Diss. 1993.
- D38 LENK, E.:
Zur Problematik der technischen Bewertung.
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 13)
Zugl. München: TU, Diss. 1993.
- D39 STUFFER, R.:
Planung und Steuerung der Integrierten Produktentwicklung.
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 14)
Zugl. München: TU, Diss. 1993.

- D40 SCHIEBELER, R.:
Kostengünstig Konstruieren mit einer rechnergestützten Konstruktionsberatung.
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 15)
Zugl. München: TU, Diss. 1993.
- D41 BRUCKNER, J.:
Kostengünstige Wärmebehandlung durch Entscheidungsunterstützung in Konstruktion und Härtereie.
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 16)
Zugl. München: TU, Diss. 1993.
- D42 WELLNIAK, R.:
Das Produktmodell im rechnerintegrierten Konstruktionsarbeitsplatz.
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 17)
Zugl. München: TU, Diss. 1994.
- D43 SCHLÜTER, A.:
Gestaltung von Schnappverbindungen für montagegerechte Produkte.
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 18)
Zugl. München: TU, Diss. 1994.
- D44 WOLFRAM, M.:
Feature-basiertes Konstruieren und Kalkulieren.
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 19)
Zugl. München: TU, Diss. 1994.
- D45 STOLZ, P.:
Aufbau technischer Informationssysteme in Konstruktion und Entwicklung am Beispiel eines elektronischen Zeichnungsarchives.
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 20)
Zugl. München: TU, Diss. 1994.
- D46 STOLL, G.:
Montagegerechte Produkte mit feature-basiertem CAD.
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 21)
Zugl. München: TU, Diss. 1994.
- D47 STEINER, J. M.:
Rechnergestütztes Kostensenken im praktischen Einsatz.
Aachen: Shaker 1996. (Konstruktionstechnik München, Band 22)
Zugl. München: TU, Diss. 1995.

- D48 HUBER, T.:
Senken von Montagezeiten und -kosten im Getriebebau.
München: Hanser 1995. (Konstruktionstechnik München, Band 23)
Zugl. München: TU, Diss. 1995.
- D49 DANNER, S.:
Ganzheitliches Anforderungsmanagement für marktorientierte Entwicklungsprozesse.
Aachen: Shaker 1996. (Konstruktionstechnik München, Band 24)
Zugl. München: TU, Diss. 1996.
- D50 MERAT, P.:
Rechnergestützte Auftragsabwicklung an einem Praxisbeispiel.
Aachen: Shaker 1996. (Konstruktionstechnik München, Band 25)
Zugl. München: TU, Diss. 1996 u. d. T.: Merat, P.: Rechnergestütztes Produktleitsystem
- D51 AMBROSY, S.:
Methoden und Werkzeuge für die integrierte Produktentwicklung.
Aachen: Shaker 1997. (Konstruktionstechnik München, Band 26)
Zugl. München: TU, Diss. 1996.
- D52 GIAPOULIS, A.:
Modelle für effektive Konstruktionsprozesse.
Aachen: Shaker 1998. (Konstruktionstechnik München, Band 27)
Zugl. München: TU, Diss. 1996.
- D53 STEINMEIER, E.:
Realisierung eines systemtechnischen Produktmodells – Einsatz in der Pkw-Entwicklung.
Aachen: Shaker 1998. (Konstruktionstechnik München, Band 28)
Zugl. München: TU, Diss. 1998.
- D54 KLEEDÖRFER, R.:
Prozeß- und Änderungsmanagement der Integrierten Produktentwicklung.
Aachen: Shaker 1998. (Konstruktionstechnik München, Band 29)
Zugl. München: TU, Diss. 1998.
- D55 GÜNTHER, J.:
Individuelle Einflüsse auf den Konstruktionsprozeß.
Aachen: Shaker 1998. (Konstruktionstechnik München, Band 30)
Zugl. München: TU, Diss. 1998.
- D56 BIRSACK, H.:
Methode für Kraftleinleitungsstellenkonstruktion in Blechstrukturen.
München: TU, Diss. 1998.

- D57 IRLINGER, R.:
Methoden und Werkzeuge zur nachvollziehbaren Dokumentation in der Produktentwicklung.
Aachen: Shaker 1999. (Konstruktionstechnik München, Band 31)
Zugl. München: TU, Diss. 1998.
- D58 EILETZ, R.:
Zielkonfliktmanagement bei der Entwicklung komplexer Produkte – am Bsp. PKW-
Entwicklung.
Aachen: Shaker 1999. (Konstruktionstechnik München, Band 32)
Zugl. München: TU, Diss. 1999.
- D59 STÖBER, R.:
Zielkostenmanagement in integrierten Produkterstellungsprozessen.
Aachen: Shaker 1999. (Konstruktionstechnik München, Band 33)
Zugl. München: TU, Diss. 1999.
- D60 PHLEPS, U.:
Recyclinggerechte Produktdefinition – Methodische Unterstützung für Upgrading und Verwer-
tung.
Aachen: Shaker 1999. (Konstruktionstechnik München, Band 34)
Zugl. München: TU, Diss. 1999.
- D61 BERNARD, R.:
Early Evaluation of Product Properties within the Integrated Product Development.
Aachen: Shaker 1999. (Konstruktionstechnik München, Band 35)
Zugl. München: TU, Diss. 1999.
- D62 ZANKER, W.:
Situative Anpassung und Neukombination von Entwicklungsmethoden.
Aachen: Shaker 1999. (Konstruktionstechnik München, Band 36)
Zugl. München: TU, Diss. 1999.

Reihe Produktentwicklung München

- D63 ALLMANSBERGER, G.:
Erweiterung der Konstruktionsmethodik zur Unterstützung von Änderungsprozessen in der Pro-
duktentwicklung.
München: Dr. Hut 2001. (Produktentwicklung München, Band 37)
Zugl. München: TU, Diss. 2000.

- D64 ABMANN, G.:
Gestaltung von Änderungsprozessen in der Produktentwicklung.
München: Utz 2000. (Produktentwicklung München, Band 38)
Zugl. München: TU, Diss. 2000.
- D65 BICHLMAIER, C.:
Methoden zur flexiblen Gestaltung von integrierten Entwicklungsprozessen.
München: Utz 2000. (Produktentwicklung München, Band 39)
Zugl. München: TU, Diss. 2000.
- D66 DEMERS, M. T.:
Methoden zur dynamischen Planung und Steuerung von Produktentwicklungsprozessen.
München: Dr. Hut 2000. (Produktentwicklung München, Band 40)
Zugl. München: TU, Diss. 2000.
- D67 STETTER, R.:
Method Implementation in Integrated Product Development.
München: Dr. Hut 2000. (Produktentwicklung München, Band 41)
Zugl. München: TU, Diss. 2000.
- D68 VIERTLBÖCK, M.:
Modell der Methoden- und Hilfsmiteleinführung im Bereich der Produktentwicklung.
München: Dr. Hut 2000. (Produktentwicklung München, Band 42)
Zugl. München: TU, Diss. 2000.
- D69 COLLIN, H.:
Management von Produkt-Informationen in kleinen und mittelständischen Unternehmen.
München: Dr. Hut 2001. (Produktentwicklung München, Band 43)
Zugl. München: TU, Diss. 2001.
- D70 REISCHL, C.:
Simulation von Produktkosten in der Entwicklungsphase.
München: Dr. Hut 2001. (Produktentwicklung München, Band 44)
Zugl. München: TU, Diss. 2001.
- D71 GAUL, H.-D.:
Verteilte Produktentwicklung – Perspektiven und Modell zur Optimierung.
München: Dr. Hut 2001. (Produktentwicklung München, Band 45)
Zugl. München: TU, Diss. 2001.

- D72 GIERHARDT, H.:
Global verteilte Produktentwicklungsprojekte – Ein Vorgehensmodell auf der operativen Ebene.
München: Dr. Hut 2002. (Produktentwicklung München, Band 46)
Zugl. München: TU, Diss. 2001.
- D73 SCHOEN, S.:
Gestaltung und Unterstützung von Community of Practice.
München: Utz 2000. (Produktentwicklung München, Band 47)
Zugl. München: TU, Diss. 2000.
- D74 BENDER, B.:
Zielorientiertes Kooperationsmanagement.
München: Dr. Hut 2001. (Produktentwicklung München, Band 48)
Zugl. München: TU, Diss. 2001.
- D75 SCHWANKL, L.:
Analyse und Dokumentation in den frühen Phasen der Produktentwicklung.
München: Dr. Hut 2002. (Produktentwicklung München, Band 49)
Zugl. München: TU, Diss. 2002.
- D76 WULF, J.:
Elementarmethoden zur Lösungssuche.
München: Dr. Hut 2002. (Produktentwicklung München, Band 50)
Zugl. München: TU, Diss. 2002.
- D77 MÖRTL, M.:
Entwicklungsmanagement für langlebige, upgradinggerechte Produkte.
München: Dr. Hut 2002. (Produktentwicklung München, Band 51)
Zugl. München: TU, Diss. 2002.
- D78 GERST, M.:
Strategische Produktentscheidungen in der integrierten Produktentwicklung.
München: Dr. Hut 2002. (Produktentwicklung München, Band 52)
Zugl. München: TU, Diss. 2002.
- D79 AMFT, M.:
Phasenübergreifende bidirektionale Integration von Gestaltung und Berechnung.
München: Dr. Hut 2003. (Produktentwicklung München, Band 53)
Zugl. München: TU, Diss. 2002.
- D80 FÖRSTER, M.:
Variantenmanagement nach Fusionen in Unternehmen des Anlagen- und Maschinenbaus.
München: TU, Diss. 2003.

- D81 GRAMANN, J.:
Problemmodelle und Bionik als Methode.
München: Dr. Hut 2004. (Produktentwicklung München, Band 55)
Zugl. München: TU, Diss. 2004.
- D82 PULM, U.:
Eine systemtheoretische Betrachtung der Produktentwicklung.
München: Dr. Hut 2004. (Produktentwicklung München, Band 56)
Zugl. München: TU, Diss. 2004.
- D83 HUTTERER, P.:
Reflexive Dialoge und Denkbausteine für die methodische Produktentwicklung
München: Dr. Hut 2005. (Produktentwicklung München, Band 57)
Zugl. München: TU, Diss. 2005.
- D84 FUCHS, D.:
Konstruktionsprinzipien für die Problemanalyse in der Produktentwicklung.
München: Dr. Hut 2006. (Produktentwicklung München, Band 58)
Zugl. München: TU, Diss. 2005.
- D85 PACHE, M. W.:
Sketching for Conceptual Design – Empirical Results and Future Tools
München: Dr. Hut 2005. (Produktentwicklung München, Band 59)
Zugl. München: TU, Diss. 2005.
- D86 BRAUN, T.:
Methodische Unterstützung der strategischen Produktplanung in einem mittelständisch geprägten Umfeld.
München: Dr. Hut 2005. (Produktentwicklung München, Band 60)
Zugl. München: TU, Diss. 2005.
- D87 JUNG, C.:
Anforderungskklärung in interdisziplinärer Entwicklungsumgebung.
München: Dr. Hut 2006. (Produktentwicklung München, Band 61)
Zugl. München: TU, Diss. 2006.
- D88 HEBLING, T.:
Einführung der Integrierten Produktpolitik in kleinen und mittelständischen Unternehmen.
München: Dr. Hut 2006. (Produktentwicklung München, Band 62)
Zugl. München: TU, Diss. 2006.

- D89 STRICKER, H.:
Bionik in der Produktentwicklung unter der Berücksichtigung menschlichen Verhaltens.
München: Dr. Hut 2006. (Produktentwicklung München, Band 63)
Zugl. München: TU, Diss. 2006.
- D90 NIBL, A.:
Modell zur Integration der Zielkostenverfolgung in den Produktentwicklungsprozess.
München: Dr. Hut 2006. (Produktentwicklung, Band 64)
Zugl. München: TU, Diss. 2006.
- D91 MÜLLER, F.:
Intuitive digitale Geometriemodellierung in frühen Entwicklungsphasen.
München: Dr. Hut 2007. (Produktentwicklung, Band 65)
Zugl. München: TU, Diss. 2006.
- D92 ERDELL, E.:
Methodenanwendung in der Hochbauplanung – Ergebnisse einer Schwachstellenanalyse.
München: Dr. Hut 2006. (Produktentwicklung München, Band 66)
Zugl. München: TU, Diss. 2006.
- D93 GAHR, A.:
Pfadkostenrechnung individualisierter Produkte.
München: Dr. Hut 2006. (Produktentwicklung München, Band 67)
Zugl. München: TU, Diss. 2006.