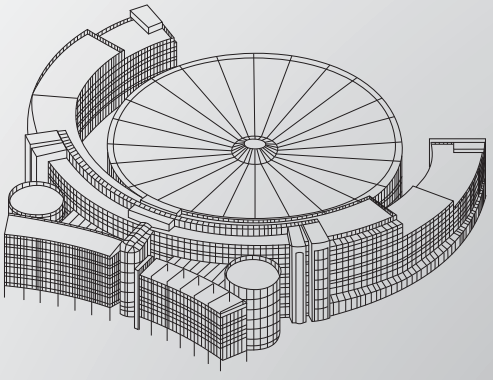
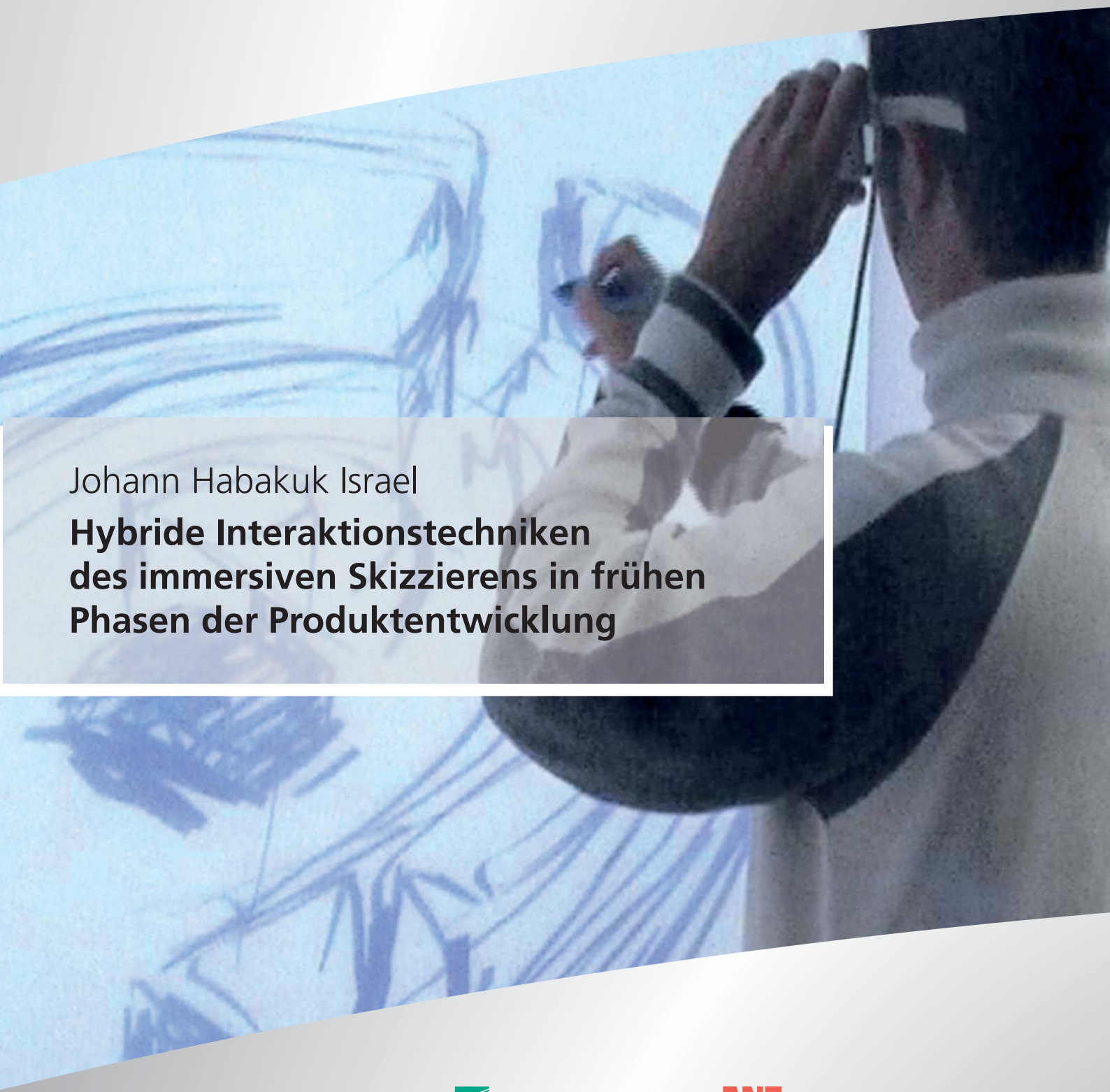
BERICHTE AUS DEM
PRODUKTIONSTECHNISCHEN
ZENTRUM BERLIN





Johann Habakuk Israel

Hybride Interaktionstechniken des immersiven Skizzierens in frühen Phasen der Produktentwicklung

Fraunhofer IPK
INSTITUT
PRODUKTIONSANLAGEN UND
KONSTRUKTIONSTECHNIK

IWF
INSTITUT
WERKZEUGMASCHINEN UND FABRIKBETRIEB
TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERLIN

BERICHTE AUS DEM
PRODUKTIONSTECHNISCHEN ZENTRUM BERLIN

Johann Habakuk Israel

Hybride Interaktionstechniken des immersiven Skizzierens in frühen Phasen der Produktentwicklung

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Rainer Stark
Prof. Dr.-Ing. R. Jochem
Prof. Dr.-Ing. J. Krüger
Prof. Dr.-Ing. K. Mertins
Prof. Dr.-Ing. M. Rethmeier
Prof. Dr. rer. nat. M. Schmidt
Prof. Dr.-Ing. G. Seliger
Prof. Dr. h. c. Dr.-Ing. E. Uhlmann

Fraunhofer IPK
INSTITUT PRODUKTIONSANLAGEN UND KONSTRUKTIONSTECHNIK

INSTITUT WERKZEUGMASCHINEN UND FABRIKBETRIEB
TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERLIN

Kontaktadresse:
Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik IPK
Pascalstraße 8-9
10587 Berlin
Telefon 030 39006-0
Fax 030 39110-37
E-Mail info@ipk.fraunhofer.de
URL www.ipk.fraunhofer.de

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.
ISBN: 978-3-8396-0330-7

D 83

Zugl.: Berlin, TU, Diss., 2010

Druck: Mediendienstleistungen des
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB, Stuttgart

Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

© by FRAUNHOFER VERLAG, 2011
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB
Postfach 800469, 70504 Stuttgart
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart
Telefon 0711 970-2500
Fax 0711 970-2508
E-Mail verlag@fraunhofer.de
URL http://verlag.fraunhofer.de

Alle Rechte vorbehalten
Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.
Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften.
Soweit in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden ist, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen.

Hybride Interaktionstechniken des immersiven Skizzierens in frühen Phasen der Produktentwicklung

vorgelegt von

Dipl.-Inform. Johann Habakuk Israel

aus Leipzig

von der Fakultät V - Verkehrs- und Maschinensysteme

der Technischen Universität Berlin

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften

- Dr.-Ing. -

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Jörg Krüger

Berichter: Prof. Dr.-Ing. Rainer Stark

Berichter: Prof. Dr.-Ing. Matthias Rötting

Berichter: Prof. Dr.-Ing. Frank-Lothar Krause

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 27. November 2009

Berlin, 2010

D 83

Summary

As immersive 3D user interfaces reach broader acceptance, their use for creative, conceptual design attracts both academic and industrial interests. So far, little is known about the user requirements and cognitive aspects of immersive 3D design, e.g. sketching and modelling. The integration of the latter into the workflow of virtual product creation is also far from being achieved.

The aim of this thesis is to open up support for creative design by integrating virtual reality technology, tangible user interfaces and the methodology of sketching into the processes of virtual product creation. This thesis follows a user-centered approach and investigates the usability of immersive sketching in various studies: a focus group expert discussion, two comparative user studies on immersive 3D sketching conducted among professional furniture designers, and a comparative study on interacting with hybrid tools in virtual environments.

The results of the focus group discussions show a strong interest in using the three-dimensional space as a medium for conceptual design. Users expect it to provide new means for the sketching process, namely spatiality, one-to-one proportions, associations, and formability.

A comparative study was initiated in order to find and investigate advantages of immersive three-dimensional space and its additional degrees-of-freedom for creative/reflective externalization processes. A 3D and a 2D baseline condition were compared in the same technical environment, an immersive VR-Cave system. The user study was conducted among 24 professional designers and engineers. The results show significant effects in favour of the supporting potential of immersive sketching, in particular the interactive engagement with the sketch already during the first design phase, the one-to-one proportionality and stimulating hedonic factors. A qualitative analysis of user statements further revealed the necessity for technical improvements and enhancements.

Another two comparative user studies investigated the design of both interaction tools and techniques for basic manipulation tasks and sketching in virtual environments. It was found that hybrid tools which consist of physical, tangible parts and virtual parts are currently the optimal solution for immersive sketching tasks.

This thesis argues that as we progress towards novel digital product development processes, immersive sketching along with new tangible interaction techniques will reach a significant position in conceptual product design. The thesis provides a strong empirical fundament in favour of the industrial application of immersive sketching and the use of immersive sketching techniques as a complementary function in tasks such as interactive design reviews and CAD-modelling.

Zusammenfassung

Mit der wachsenden Verbreitung dreidimensionaler Benutzungsschnittstellen wächst auch das Interesse, diese für kreative, konzeptionelle Entwurfstätigkeiten einzusetzen. Benutzeranforderungen und kognitive Aspekte des immersiven Designs, insbesondere des Skizzierens und Modellierens, sind bisher jedoch kaum bekannt. Eine technische Integration in die Systeme der Virtuellen Produktentstehung wurde bisher ebenfalls nicht vollzogen.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, Unterstützungsmöglichkeiten für kreative Entwurfstätigkeiten durch die Verknüpfung von Virtual Reality-Technologie, fühlbaren Benutzungsschnittstellen und der Methodik des Skizzierens zu erschließen und im Rahmen der Virtuellen Produktentwicklung zu verankern. Diese Arbeit verfolgte dazu einen benutzerzentrierten Ansatz und untersuchte die Gebrauchstauglichkeit des immersiven dreidimensionalen Skizzierens anhand mehrerer Studien: einer Expertendiskussion im Rahmen einer Fokusgruppenstudie, zweier vergleichender Benutzerstudien des immersiven Skizzierens unter professionellen Möbeldesignern und einer Studie zur Interaktion mit hybriden Werkzeugen in virtuellen Umgebungen.

Die Ergebnisse der Fokusgruppe zeigten ein starkes Interesse der avisierten Nutzer am Gebrauch des dreidimensionalen Raums als eines Mediums für das konzeptionelle Entwerfen. Die Nutzer erwarten davon zusätzliche Möglichkeiten für den Entwurfsprozess, insbesondere Räumlichkeit, Eins-zu-eins-Proportionalität, Assoziativität und Formbarkeit der Skizzen.

Eine vergleichende Studie hatte zum Ziel, Vorteile des dreidimensionalen Raums und des zusätzlichen räumlichen Freiheitsgrades für kreative/reflektierende Externalisierungsprozesse zu untersuchen. Dazu wurden eine 3D- und 2D-Bedingung innerhalb identischer technischer Bedingungen miteinander verglichen. In dieser Studie, an der 24 berufserfahrene Designer und Konstrukteure teilnahmen, konnten signifikante Unterschiede gefunden werden, die die Unterstützungsfunktion des dreidimensionalen Skizzierens unterstreichen. Hier sind insbesondere die interaktive Auseinandersetzung des Skizzierenden mit der Skizze schon während der ersten Entwurfsphase, die Eins-zu-eins-Räumlichkeit sowie stimulierende hedonistische Faktoren zu nennen. Die qualitative Analyse der Benutzeräußerungen ergab darüber hinaus Hinweise auf technische Herausforderungen und Notwendigkeiten zur Weiterentwicklung.

Zwei weitere vergleichende Benutzerstudien untersuchten die Gestaltung von Interaktionswerkzeugen und –techniken für einfache Manipulationsaufgaben und immersives Skizzieren in virtuellen Umgebungen. Es konnte gezeigt werden, dass hybride Werkzeuge, die aus physischen und virtuellen Anteilen bestehen, derzeit die optimal Lösung für immersive Skizzieraufgaben darstellen.

Die empirisch gewonnen Ergebnisse dieser Arbeit unterstreichen die bedeutende Rolle des immersive Skizzieren für zukünftige Systeme der Virtuellen Produktentstehung. In industriellen Anwendungen können Techniken des immersiven Skizzierens anfangs auch als komplementäre Werkzeuge in interaktiven Design-Reviews und in CAD-Modellieraufgaben zum Einsatz kommen.

Geleitwort der Herausgeber

Die Schriftenreihe „Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin“ wird von den Professoren der im Produktionstechnischen Zentrum Berlin dauerhaft angelegten Fach- und Forschungsgebiete der TU Berlin gemeinsam herausgegeben. Zweck der Schriftenreihe ist es, die auf den Gebieten der Produktentstehung, Produktionstechnik und Informationstechnik erarbeiteten Forschungsergebnisse einer breiten Fachöffentlichkeit zugänglich zu machen. In der Schriftenreihe erscheinen in erster Linie die an den Fachgebieten des Instituts für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb (IWF) der TU Berlin und am Fraunhofer Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik (IPK) entstandenen Dissertationen. Daneben werden aber auch andere Forschungsberichte, die in den thematischen Rahmen passen und von allgemeinem Interesse sind, in die Schriftenreihe aufgenommen. Die Herausgeber wünschen sich ein reges Interesse an der Schriftenreihe und würden sich freuen, wenn hieraus fruchtbare Dialoge mit Praktikern und Forschern entstünden.

Die vorliegende Dissertationsarbeit von Herrn Dr. Israel beschäftigt sich mit der Erforschung und Entwicklung neuer Interaktionstechniken für das freie, dreidimensionale Skizzieren von technischen Produkten mit Hilfe von Technologien der Virtuellen Realität. Die Arbeit ist geprägt von dem Ziel, zukünftig eine neue Symbiose zwischen Menschen, hier insbesondere Designern und Ingenieuren, dem technischen Medium Virtuelle Realität, den damit gekoppelten innovativen Interaktionsgeräten sowie den kreativ zu skizzierenden virtuellen Produkten zu ermöglichen. Die wissenschaftlichen Erkenntnisse und die aus der Forscherarbeit entstandenen Demonstratoren zeigen anschaulich und eindeutig, dass der Traum einer immersiv konstruktiven Arbeitsweise mit Hilfe der neuen Medien und Interaktionsformen in absehbarer Zeit Wirklichkeit der täglichen Ingenieurarbeit werden kann.

Berlin, September 2011

Rainer Stark

Vorwort des Autors

Viele Menschen haben am Entstehen dieser Arbeit einen direkten oder indirekten Anteil, ihnen möchte ich an dieser Stelle herzlich danken.

Mein erster Dank gilt Prof. Dr.-Ing. Rainer Stark, der diese Arbeit gefördert und betreut hat. Durch seinen Rat und seine Kritik haben Methode und Struktur dieser Arbeit wesentlich gewonnen. Der von ihm stets eingeforderte wechselseitige Austausch zwischen wissenschaftlicher Forschung und industrieller Anwendung verhalf dieser Arbeit zudem zu größerer Praxisnähe. Ihm verdanke ich auch die Erkenntnis, dass es trotz hochentwickelter digitaler Technologien die menschlichen „Kümmerer" sind, die wesentliche Integrationsleistungen der Virtuellen Produktentstehung vollbringen. In deren Tätigkeiten wird sichtbar, welche eigentlichen Herausforderungen an neue Technologien bestehen.

Der regelmäßige Austausch mit Prof. Dr.-Ing. Matthias Rötting in Gesprächen, Vorlesungen und Doktorandenseminaren war eine konstante Stütze und Motivationsquelle über die gesamte Dauer meiner Promotion. Ihm verdanke ich die Fundierung meiner Arbeit in den Bereichen Human Factors und User Centered Design. Prof. Dr.-Ing. Frank-Lothar Krause danke ich für die intensive Unterstützung bei der Findung und Vertiefung des Themas dieser Arbeit. Ihm danke ich auch, dass er das Graduiertenkolleg mit aus der Taufe gehoben hat, an dem diese Forschungsarbeit möglich wurde. Meinem Mentor Dr.-Ing. Jens Neumann danke ich für die enge Begleitung meiner Arbeit und seinen Rat zu allen Fragen der Virtuellen Realität.

Diese Arbeit ist am Graduiertenkolleg prometei und am Geschäftsfeld Virtuelle Produktenstehung des Fraunhofer Instituts für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik entstanden. Der interdisziplinäre Charakter des Graduiertenkollegs aus Psychologie, Ingenieurswissenschaften und Informatik findet sich auch in dieser Arbeit wieder. Von dem täglichen interdisziplinären Austausch habe ich persönlich sehr profitiert. Denjenigen, die das Graduiertenkolleg ermöglicht und mit Leben erfüllt haben, möchte ich daher herzlich danken, stellvertretend den Sprechern Prof. Dr.-Ing. Leon Urbas und Prof. Dr. Manfred Thüring sowie meinen Kollegiaten Dr.-Ing. Tilman Barz, Dr.-Ing. Carmen Bruder, Caroline Clemens, M.A., Dr.-Ing. Jeronimo Dzaack, Dr.-Ing. Nicola Fricke, Dr. Charlotte Glaser, Dipl.-Psych. Barbara-Ulrike Gross, Dr.-Ing. Marcus Heinath, Dr.-Ing. Jörn Hurtienne, Dr.-Ing. Jörg Huss, Dr. Jürgen Kiefer, Dipl.-Psych. Anne Klostermann, Dr. Cordula Krinner, Dr.-Ing. Sascha Mahlke, Dr.-Ing. Carsten Mohs und Dr.-Ing. Nele Pape.

Der interdisziplinäre Austausch fand einen Höhepunkt in der intensiven Auseinandersetzung und im Arbeiten des Arbeitskreises Intuitive Use of User Interfaces (IUUI), der im Graduiertenkolleg prometei initiiert wurde und bald darüber hinaus wuchs. Hier wurde nicht nur an einer Definition des Begriffs „intuitive Interaktion" gearbeitet, sondern auch an einem gemeinsamen Verständnis der Interaktion mit technischen Systemen. Für den Austausch und die freundschaftliche Zusammenarbeit danke ich Dr.-Ing. Jörn Hurtienne, Vertr. Prof. Steffi Hußlein, Dr. Martin Christof Kindsmüller, Claus Knapheide, M.A., Dr. Herbert Meyer, Dr.-Ing. Carsten Mohs, Dr. Anja Naumann und Dipl.-Psych. Anna Pohlmeyer.

Meine Kollegen der Abteilung Produktmodellierung am Geschäftsfeld Virtuelle Produktentstehung des Fraunhofer IPK waren die tägliche Stütze meiner Arbeit, mit ihnen diskutierte ich Fragen und Herausforderungen zuerst, hier bekam ich täglich Rat und freundschaftlichen Zuspruch. Ich danke herzlich Dipl.-Ing. Julian Adenauer, Boris Beckmann-Dobrev, M.Sc., Dipl.-Ing. Asmus

Figge, Hans-Joachim Greinert, Dipl.-Ing. Marcus Kim, Dr.-Ing. Jens Neumann, Dipl.-Inform. Andreas Romahn, Dipl.-Ing. Uwe Rothenburg, Luciano Schrama, Dipl.-Inform. Ulrike Völlinger, Dipl.-Psych. Eva Wiese und Dipl.-Ing. Thomas Wöhler sowie allen Kollegen am Geschäftsfeld Virtuelle Produktentstehung.

Ohne die Unterstützung besonders engagierter studentischer Mitarbeiter hätte diese Arbeit nicht fertig gestellt werden können. Ich danke insbesondere Frau Dipl.-Psych. Magdalena Mateescu für ihre Unterstützung bei der Auswertung meiner Studien. Darüber hinaus danke ich für ihre engagierte Arbeit Dipl.-Inform. Gunnar Bittersmann, Patrick Tobias Fischer, M.Sc., Lennart Kulf, Rasim Korkot, M.Sc., Dipl.-Psych. Tobias Feldmann-Wüstefeld, Dipl.-Psych. Elisabeth Zacharias, Oliver Belaifa und Dipl.-Inform. Achim Meyer.

Neue Formen der Mensch-Maschine-Interaktion im Sinne einer ästhetischen, physischen Interaktion zu finden, war von Beginn an eines der Ziele und „Herzenssachen" meiner Promotion. Der seit einigen Jahren stetig wachsenden Forschungsgemeinschaft im Bereich „Tangible Interaction" fühle ich mich darin verbunden und danke für die zahlreichen gut organisierten Veranstaltungen, gemeinsamen Veröffentlichungen, die oft pointierten Diskussionen und den tiefgehenden Austausch Dr. Eva Hornecker, Dr. Caroline Hummels, Dipl.-Psych. Jörn Huritenne und Bart Hengeveld.

Zu den großen Glücksfällen meiner Promotion gehört der Kontakt mit Prof. Dr. Jörg Petruschat und Angelika Petruschat, die mir eine lebendige Vorstellung des Produktdesigns und dessen Wirkung auf Individuum und Gesellschaft vermittelt haben. Hieraus ergab sich die ebenso lebendige Zusammenarbeit mit Dipl.-Des. Christian Zöllner, der das Forschungsprojekt des immersiven Skizzierens mit seiner Diplomarbeit, dem Entwurf der Skizzierwerkzeuge und seiner Energie enorm berreichert hat. Für ihren wiederholten Rat bei der Planung und Auswertung meiner Skizzierstudien danke ich Dipl.-Ing. Helmut Jansen, Prof. Axel Kufus und Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt-Kretschmer.

Für das Redigieren meiner Arbeit danke ich herzlich meinem Vater Dipl. phil. Jürgen Israel, Verlagslektor und Publizist. Wichtige Anregungen und Kommentare zur schriftlichen Ausarbeitung dieser Arbeit habe ich auch dankend von Dr. Berit Baeßler, Dr.-Ing. Jörn Hurtienne und Dipl.-Ing. Thomas Wöhler erhalten. Veröffentlichungen von Teilen dieser Arbeit in englischer Sprache wurden dankenswerter Weise von Richard Holmes, M.A. redigiert.

Schließlich möchte ich meiner Familie und meinen Freunden für ihren Beistand, ihre Hilfe und ihr Verständnis herzlich danken; meinen Eltern Dr. Agathe Israel und Jürgen Israel, meiner Schwester Else Israel, ihren Kindern Sofian und Yasid und meiner Schwester Golde Grunske mit Albrecht, Wieland, Margarethe und Emil und meiner Tante Ingeborg Köhler. Ich schließe auch meine verstorbenen Großeltern Anneliese und Martin Israel und Rosemarie Köhler in meinen herzlichen Dank ein. Meinen Freunden danke ich für viele verbindenden Erlebnisse, Gespräche und Reisen in bewegten Zeiten; stellvertretend für viele: Berit Baeßler, Björn Reißmann, Hulda Gill, Friederike Lange, Silvia Remde, Sven Richter, Elise Schüßler und Thomas Schuster.

Es konnten nicht alle erwähnt werden, die einen Anteil an dieser Arbeit haben, sie sind in den Dank aber ausdrücklich eingeschlossen. Diese Arbeit widme ich mit großer Freude meinen Neffen Sofian und Yasid Israel.

Berlin, November 2009

Johann Habakuk Israel

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 1

1.1 Motivation und Hintergrund 2

1.2 Ziele 8

1.3 Methodisches Vorgehen: User Centered Design 9

1.4 Wissenschaftlicher Beitrag und Gliederung 11

2 Skizzieren in frühen Produktentwicklungsphasen 15

2.1 Skizzieren in den frühen Phasen der Produktentwicklung 16

2.2 Innovative und kreative Freiheitsgrade der frühen Entwicklungsphasen 21

2.3 Prozesse des Produktdesign - Designintegrierte Produktentwicklung 29

2.4 Zusammenfassung 32

3 Skizzieren als elementares Werkzeug kreativer Entwurfsprozesse 33

3.1 Psychologische Grundlagen des Skizzierens und Konstruierens 34

3.2 Faktoren kreativen Denkens und Handelns 47

3.3 Zusammenfassung 58

4 Mixed Reality und Tangible User Interfaces: Neue Konzepte der Mensch-Maschine-Interaktion zur Unterstützung kreativer Interaktions- und Selbstkommunikationsprozesse 59

4.1 Wahrnehmungsbezogene Faktoren der Interaktion in hybriden physisch/virtuellen Räumen 60

4.2 Ebenen der Mensch-Maschine-Interaktion 67

4.3 Virtual Reality und 3D-User Interfaces 70

4.4 Technische und wahrnehmungsbezogene Determinanten der Mensch-Maschine-Interaktion in immersiven Systemen 84

4.5 Mixed Reality und Tangible User Interfaces 93

4.6 Zusammenfassung 105

5 Studie 1: Analyse der Benutzeranforderungen an immersives dreidimensionales Skizzieren – Ergebnisse einer Expertenbefragung 107

5.1 Benutzerzentrierte Anforderungsanalyse 108

5.2 Bisherige Untersuchungen 108

5.3 Ziele und Durchführung der Befragung 125

5.4 Auswertung 129

5.5 Ergebnisse 129

5.6 Diskussion und Schlussfolgerungen 132

5.7 Zusammenfassung....134

6 Ableitung von Hypothesen zum Unterstützungspotenzial des immersiven dreidimensionalen Skizzierens für kreative Skizzierprozesse....135

6.1 Forschungsfragen....136

6.2 Operationalisierung des Unterstützungspotenzials kreativer Skizzierprozesse....137

6.3 Hypothese 1: Unterstützungspotenzial immersiver dreidimensionaler Skizziersysteme für kreative Entwurfsprozesse....137

6.4 Hypothese 2: Gestaltung von VR-Interaktionswerkzeuge zur Erhöhung der Gebrauchstauglichkeit basaler Interaktionen....139

6.5 Hypothese 3: Gestaltung von VR-Interaktionswerkzeugen zur Unterstützung kreativer Skizzierprozesse....140

6.6 Zusammenfassung....141

7 Studie 2: Vergleichende Untersuchung des immersiven Skizzierens mit zwei und drei räumlichen Freiheitsgraden....143

7.1 Hypothesen....144

7.2 Interaktionstechniken....144

7.3 Erhebungs- und Bewertungsmethoden....147

7.4 Teilnehmer....151

7.5 Experimentelle Skizzieraufgaben....152

7.6 Design und Ablauf des Versuchs....155

7.7 Auswertungsmethode....156

7.8 Ergebnisse – Prozesseigenschaften (Skizzieren)....157

7.9 Ergebnisse – Skizzeneigenschaften....169

7.10 Diskussion....176

7.11 Zusammenfassung....180

8 Studie 3: Untersuchung des Einflusses hybrider Werkzeuge auf die Benutzerleistung bei der Lösung von Canonical-Manipulation-Tasks....183

8.1 Motivation....184

8.2 Vorarbeiten....184

8.3 Hypothesen....186

8.4 Interaktionstechniken....186

8.5 Erhebungs- und Bewertungsmethoden....188

8.6 Teilnehmer....188

8.7 Experimentelle Aufgaben....188

8.8 Design und Ablauf des Versuchs 191
8.9 Auswertungsmethode 192
8.10 Ergebnisse 193
8.11 Diskussion 200
8.12 Zusammenfassung 203
9 Studie 4: Untersuchung physischer, hybrider und virtueller Werkzeuge im immersiven dreidimensionalen Skizzierprozess 205
9.1 Hypothesen 206
9.2 Interaktionstechniken 206
9.3 Fragebögen und Protokolle, Messverfahren kreativer Produkte 209
9.4 Experimentelle Skizzieraufgaben 210
9.5 Teilnehmer, Design und Ablauf des Versuchs 212
9.6 Auswertungsmethode 213
9.7 Ergebnisse – Prozesseigenschaften (Skizzieren) 214
9.8 Ergebnisse – Skizzeneigenschaften 224
9.9 Diskussion 230
9.10 Zusammenfassung 233
10 Zusammenfassung und Fazit 235
10.1 Zusammenfassung 235
10.2 Fazit und Ausblick 240
11 Literatur 251
12 Anhang 273
12.1 Der Designprozess im Fahrzeugbau 274
12.2 Der Designprozess in der Möbelindustrie 276
12.3 Signalstärke und Rauschen in der Mensch-Maschine-Interaktion 279
12.4 Fitts' Law im dreidimensionalen Raum 280
12.5 Mixed Reality Interaktionstechniken im dreidimensionalen Skizziersystem SketchApp 283
12.6 Auswertungsmethoden 291
12.7 Material der Studie 1: Fokusgruppen 296
12.8 Material der Studie 2: Immersives Skizzieren mit 3 räumlichen Freiheitsgraden 308
12.9 Material der Studie 3: Hybride Objekte in virtuellen Umgebungen 337
12.10 Material der Studie 4: Untersuchung der grundsätzlichen Werkzeuggestaltung auf den Skizzierprozess 354

Abkürzungsverzeichnis

ANOVA: Analysis of Variance (dt. Varianzanalyse)

API: Application Programming Interface (dt. Programmierschnittstelle)

AR: Augmented Reality (dt. digital angereicherte Umgebung)

CAD: Computer Aided Design (dt. rechnergestützte Konstruktionswerkzeuge)

CAE: Computer Aided Engineering

CAID: Computer Aided Industrial Design

CAM: Computer Aided Manufacturing

CAS: Computer Aided Styling

CAVE: Computer Animated Virtual Environment

CPSS: Creative Product Semantic Scale (Bewertungsmethode, Fragebogen)

DMU: Digital Mock-Up

DoF: Degrees of Freedom (dt. Freiheitsgrade)

FMU: Functional Mock-Up

GLM: Gemischtes Lineares Modell (engl. linear mixed model)

GUI: Graphical User Interface (dt. grafische Benutzungsschnittstelle, s. WIMP)

HCI: Human Computer Interaction (dt. Mensch-Computer-Interaktion)

HMD: Head-Mounted Display (dt. am Kopf zu tragendes Anzeigegerät)

MMI: Mensch-Maschine-Interaktion

MMS: Mensch-Maschine-Systeme

MR: Mixed Reality (dt. gemischte Realität, Umgebung mit realen und virtuellen Inhalten)

PC: Personal Computer

PDM: Produktdaten Management (engl. Product Data Management)

SPSS: Statistical Package for the Social Sciences (statistische Analysesoftware)

TSD-Z: Test zum schöpferischen Denken - Zeichnerisch

TUI: Tangible User Interface (dt. fühlbare, greifbare Benutzungsschnittstelle)

UCD: User Centered Design (dt. benutzerorientiertes Design)

UI: User Interface (dt. Benutzungsschnittstelle)

VDI: Verein Deutscher Ingenieure e. V.

VE: Virtual Environment (dt. virtuelle Umgebung)

VPE: Virtuelle Produktentstehung (engl. Virtual Product Creation, VPC)

VR: Virtual Reality (dt. Virtuelle Realität)

VRML: Virtual Reality Modeling Language

WIMP: Windows, Icons, Menus, and Pointing Devices (dt. Fenster, Icons, Menüs und Zeigegeräte, s. GUI)

1
Einleitung

Kreativität ist die Fähigkeit, zu sehen (oder bewusst wahrzunehmen) und zu antworten.
Erich Fromm (1959, S. 44)

Das Ziel dieser Arbeit ist es, Unterstützungsmöglichkeiten für kreative Entwicklungstätigkeiten durch die Verknüpfung von Virtual Reality-Technologie, fühlbaren Benutzungsschnittstellen und der Methodik des Skizzierens zu erschließen und im Rahmen der Virtuellen Produktentwicklung zu verankern:

Virtual Reality-Systeme verfügen über hoch entwickelte Möglichkeiten der visuellen Darstellung digitaler Daten, ihre algorithmische Mächtigkeit (engl. *computational power*) kann jedoch aufgrund ungenügender Interaktionsmöglichkeiten zwischen Nutzer und System nicht angemessen entfaltet werden. Häufig dominiert hier noch der aus der zweidimensionalen Interaktionswelt stammende Ansatz der Maus und Zeiger-basierten Interaktion, der mittels indifferenter Interaktionsgeräte und Zeigegeräten in den dreidimensionalen Raum übertragen wurde.

Fühlbare Benutzungsschnittstellen (engl. Tangible User Interfaces, TUI) verbinden physische Objekte und digitale Daten und bieten Nutzern die Möglichkeit, digitale Daten physisch zu manipulieren. Dieses Konzept regt seit Mitte der 1990er Jahre Systementwickler, Künstler und Forscher an, hybride Systeme zu gestalten, die den digitalen Raum im physischen und geistigen Sinne „begreifbar" machen. Charakteristisch ist jedoch, dass TUI-basierte Systeme in ihrer algorithmischen Mächtigkeit und visuellen Darstellungstiefe eng begrenzt sind, und daher bisher kaum praktische Bedeutung in informationsverarbeitenden Anwendungen erlangt haben.

Skizzieren ist eine der stärksten Unterstützungsmethoden beim Entwickeln kreativer Ideen und Produkte. Sie wirkt umso stärker, je flüssiger der Skizzierende mittels Skizziermedien und -werkzeugen arbeiten kann. Die Hypothese, dass hybride physisch/virtuelle Werkzeuge und Medien geeignet sind, um solcherart kreative Selbstkommunikationsprozesse zu unterstützen, neue Freiheitsgrade des Denkens und Entwickelns zu eröffnen und dem Nutzer „zuhanden" (Heidegger, 1927) zu werden, soll mit dieser Arbeit untersucht werden.

1.1 Motivation und Hintergrund

1.1.1 Neue Herausforderungen an innovative Produktentwicklung

Produktentwicklung findet heute in einem Szenario des globalen sozioökonomischen Wandels statt. Dieser Wandel wird begleitet von rasanten technologischen Entwicklungen, insbesondere im Bereich der Informationstechnologien, die tiefgreifende Veränderungen des beruflichen und privaten Alltags bewirken. Vor diesem Hintergrund steht die Entwicklung von Gebrauchsgütern vor zahlreichen neuen Anforderungen und Möglichkeiten (vgl. u. a. Spur & Krause, 1997; Alkassar et al., 2003; Rötting, 2005; Buxton, 2007; Krause et al., 2007; Stark & Krause, 2008). Drei wichtige Beispiele hierfür sind:

- *Wachsende Bedeutung des Gebrauchskontexts*: Mit wachsender Vernetzung und informationstechnischer Integration von physischer Umwelt und digitalen Datenräumen gewinnt der Kontext, in dem Produkte verwendet werden, eine stärkere Bedeutung; sei es der private Haushalt, das Büro oder die urbane Umgebung. Produktentwickler sehen sich zunehmend mit hybriden physisch/digitalen Anwendungskontexten konfrontiert, in denen digitale Informationen allgegenwärtig sind (vgl. Buxton, 2007). Hummels et al. (2001) prognostizieren, dass der Fokus der Entwicklung von Gebrauchsgütern zukünftig auf der Entwicklung von Erlebniskontexten und weniger auf der Entwicklung einzelner Produkte liegen wird.
- *Wachsende Bedeutung ästhetischer und hedonistischer Produkteigenschaften*: Produkte müssen zukünftig, auch im beruflichen Kontext, nicht nur funktionalen, pragmatischen Anforderungen genügen. Unter Berücksichtigung kultureller Verschiedenheiten müssen sie immer mehr auch „weiche Faktoren" wie Individualisierbarkeit, Ästhetik sowie emotionale und hedonistische Bedürfnisse der Anwender erfüllen, das heißt beispielsweise stimulierend und inspirierend wirken (vgl. Kehler, 1998; Hassenzahl, 2004; Mahlke, 2008).
- *Wachsende Bedeutung hybrider und mechatronischer Produkte:* In immer mehr Gebrauchsgütern befinden sich mechanische und elektronische Komponenten, die häufig auf engstem Bauraum integriert sind und über interaktive Benutzungsschnittstellen verfügen (beispielsweise Digitalkameras, Hörgeräte, Autositze). Ihre Gebraucheigenschaften sind charakterisiert durch die Verbindung physischer und digitaler Benutzungsschnittstellen. Die Gestaltung mechatronischer Produkte ist ein multidisziplinärer Prozess, in dem neben Produktdesign auch Maschinenbau, Elektrotechnik, Informatik und andere Disziplinen beteiligt sind (vgl. VDI-2206, 2003; Ragan, 2007; Krause et al., 2007).

Um den sich ändernden benutzerseitigen und technologischen Anforderungen an neue Produkte zu entsprechen, müssen Entwicklungsmethoden stetig angepasst werden. Der Einsatz neuer Technologien kann hierbei wesentliche Unterstützungspotenziale erschließen (vgl. Krause et al., 2007).

1.1.2 Kreative Entwicklungstätigkeiten in den frühen Phasen der Produktentwicklung

Produktinnovationen werden nachhaltig von den frühen, am wenigsten formalisierbaren Phasen der Produktentwicklung bestimmt. Die Möglichkeiten, Einfluss auf Produkteigenschaften zu nehmen, sind hier am vielfältigsten, sie werden daher auch als die „produktbestimmenden Phasen" bezeichnet (Spur & Krause, 1997, S. 427). Produktinnovationen müssen daher in den frühen Phasen initiiert und methodisch verankert werden (vgl. Hacker, 2007).

Charakteristisch für Entwicklungstätigkeiten in den frühen Phasen ist ein reflektives Handeln des Entwicklers oder Konstrukteurs, bei dem die zu lösenden Gesamtaufgaben „opportunistisch" in solche Teilaufgaben zerlegt werden, für die bereits Vorwissen und Lösungsideen existieren (vgl. Hacker, 2007). Das reale Vorgehen in den frühen Phasen ähnelt „anfänglich stärker einem Fehlerkorrekturprozess als einem Prozess zielgerichtet voranschreitender Lösungsentwicklung" (a. a. O., S. XX). Die Bedeutung der Skizze als primärem Hilfsmittel eines solchen reflektiven entwerfenden Problemlösens wird immer stärker erkannt und wurde bereits in zahlreichen Forschungsarbeiten belegt (vgl. u. a. Dylla, 1991; Kehler, 1998; Römer, 2002; Sachse, 2002; Tversky, 2003; Pache, 2005; Buxton, 2007).

Skizzen gehören zu den primären Hilfsmitteln der *Lösungsentwicklung, Lösungsüberprüfung, Analyse, Dokumentation* und *Kommunikation* (vgl. Römer, 2002). Das Skizzieren wird häufig als Selbstkommunikationsprozess beschrieben, die sich in Ex- und Internalisierungsprozessen vollzieht (vgl. Abbildung 1, Schön, 1983 und Sachse 2002). Dabei werden innere Vorstellungen, beispielsweise bildliche Produktmodelle, durch Skizzierhandlungen in ein äußeres Medium übertragen. Das kontinuierliche Reflektieren über die während des Skizzierens entstehenden äußeren Bilder unterstützt die Ideenerzeugung und -objektivierung (vgl. Görner, 1973; Hacker, 1999). Digitale Skizziersysteme sollten dieses reflektive Vorgehen unterstützen und flüssiges Interagieren ermöglichen.

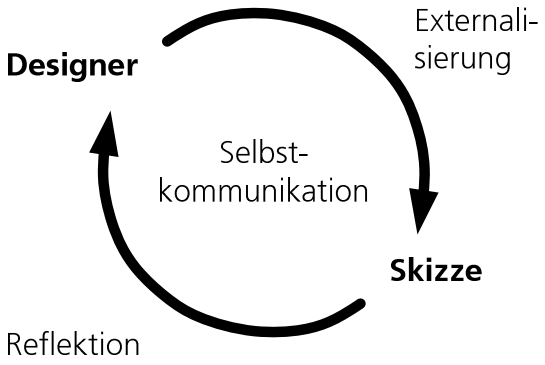


Abbildung 1: Skizzieren als Selbstkommunikationsprozess aus Externalisierung und Reflektion.

1.1.3 Bedarf neuer Interaktionsansätze zur digitalen Unterstützung des entwerfenden Problemlösens

Die Einführung von CAD-Unterstützungswerkzeuge hat Produktentwicklungs- und Konstruktionsprozesse in erheblichem Maße effizienter und transparenter werden lassen (vgl. Krause et al., 1993; Spur & Krause, 1997; Pahl et al., 2005; Ragan, 2007). Die bestehenden rechnerbasierten Werkzeuge unterstützen in erster Linie das *rationale* Herangehen und Lösen konstruktiver Probleme. Kreatives entwerfendes Problemlösens in den frühen Entwicklungsphasen ist jedoch oft durch *intuitiv* geleitetes, flüssiges und schnelles Denken und Handeln gekennzeichnet (vgl. u. a. Guilford, 1967; Hacker, 2007; Buxton, 2007). Obwohl sich Konstrukteure und Designer auch hier Unterstützung durch CAD-Systeme wünschen, werden die bestehenden Verfahren als hinderlich in Bezug auf ihre individuelle und kreative Arbeitsweise eingeschätzt (vgl. Spur & Krause, 1997). Dies ist insbesondere in der Gestaltung der Benutzungsschnittstelle begründet, die den Benutzer auf eine ungeeignete Art und Weise einbinden. Diese Benutzungsschnittestellen sind in der Regel kommando-basierte WIMP-Schnittstellen, in denen der Benutzer mittels Fenstern, Icons, Menüs und Zeigegeräten interagiert (WIMP: windows, icons, menus, and pointing devices; Nielsen, 1993). Diese Form der Mensch-Maschine-Interaktion erschwert flüssiges Arbeiten (vgl. Sachse, 2002), da sie die Interaktion des dreidimensionalen Modellierens in unverbundene Positionierungs- und Verschiebungskommandos aufbricht, die den Benutzer kognitiv stärker belasten als das Skizzieren auf Papier (vgl. Schkolne, 2006). Designer empfinden das Modellieren am Rechner als grundverschieden vom herkömmlichen Umgang mit physischen Medien: „Die Hände arbeiten nicht schwungvoll, sondern diskret: Sie lösen Befehle aus, die eine Maschine (Algorithmen) freigeben, Formen zu emulieren. Was beim Zeichnen eine rhythmische und selbstresonante Bewegung ist, ist beim CAD ein Hin und Her, bei dem Handlungsschritte (Druck auf Tastatur, Maus, board oder pad) in den Takt der Rechenmaschine verkettet sind. Während das Zeichnen zirkuliert, (…) ist das Entwerfen am Computer ein Arbeiten im Führerstand: Befehlsausgabe und Begutachtung der Befehlsausführung.“ (Petruschat, 2001b, S. 70) Aufgrund der interaktiven Defizite digitaler Systeme werden von der Mehrzahl aller Konstrukteure und Designer noch heute Strichskizzen auf Papier vorbereitend und parallel zur Nutzung von CAD-Systemen erstellt (vgl. Römer, 2002). Computerintegrierte Methoden für kreative Produktentwicklungsprozesse können daher nur erfolgreich sein, wenn sie sich neuartiger Benutzungsschnittstellen und Interaktionskonzepte bedienen, die den Menschen und seine Denk- und Handlungsprozesse in den Vordergrund stellen (vgl. Buxton, 2002).

1.1.4 Verbesserung der Interaktion mit digitalen Unterstützungssystemen durch Virtual Reality und Tangible User Interfaces

In der Virtuellen Produktentwicklung werden immer häufiger Methoden aus dem Bereich der Virtuellen Realität (VR) eingesetzt, die „die geometrischen, technologischen, physikalischen, stylingbezogenen sowie umweltbeeinflussenden Eigenschaften eines Produkts für den Menschen umfassend erfahrbar (...) machen.“ (Spur & Krause, 1997, S. 31) Durch die stärkere Einbeziehung des Menschen und seiner Umwelt wird es ermöglicht, Produktentwürfe schon in den frühen Entwicklungsphasen ganzheitlich und multisensorisch zu erstellen und immersiv zu erleben.

Nach Hummels ermöglicht dies ein emotionales Verständnis interaktiver Produkte schon im Entwicklungsprozess (vgl. Hummels, 2000).

Während VR-Technologie bereits in der Lage ist, große und hoch aufgelöste Produktmodelle zu visualisieren, sind die Möglichkeiten der Interaktion innerhalb dreidimensionaler virtueller Umgebungen jedoch nach wie vor sehr beschränkt, kompliziert und wenig gebrauchstauglich (Bowman et al., 2004, S. 5). Die Möglichkeiten der „Benutzereingabe" in heutigen VR-Systemen stehen denen der grafischen Ausgabe insbesondere im Hinblick auf Interaktionsbandbreite, Genauigkeit und Komfort immer noch weit nach. Häufig sind die Interaktionsformen in VR-Systemen denen der WIMP Welt entnommen. So müssen beispielsweise virtuelle Objekte in virtuellen Umgebungen separat selektiert und manipuliert werden (z. B. Pointing, Virtual Hand; vgl. Bowman et al., 2004), während die Manipulation realer Objekte als ineinander verschränkte Greif- und Manipulationsbewegungen erfolgt (vgl. Smeets & Brenner, 1999). Die Fähigkeiten des Nutzers im Umgang mit seiner realen, physischen Umwelt auf die Interaktion im virtuellen Raum zu übertragen, wird dadurch erschwert. Dies trifft insbesondere für Interaktionen zu, die hoch ausgebildete motorische Fähigkeiten auf Seiten des Benutzers und reiches haptisches Feedback auf Seiten des manipulierten Objekts erfordern. So sind präzises Zeichnen, Blättern, Montieren von Bauteilen oder Schreiben mit den meisten VR-Interaktionstechniken kaum oder gar nicht durchführbar.

Der insbesondere auf Ivan Sutherland (1965) zurück gehende Ansatz der „absoluten" Virtual Reality, welcher auf vollständiger Simulation und Immersion beruhte, wurde beginnend in den 1990'er Jahren vermehrt um Konzepte gemischter physischer/digitaler Umgebungen erweitert, beispielsweise Mixed Reality (vgl. Milgram & Kishino, 1994) und Graspable- bzw. Tangible User Interfaces (vgl. Fitzmaurice et al., 1995; Ishii & Ullmer, 1997; Dourish, 2001; Norman, 2007; Dix, 2006). Diesen Konzepten ist gemeinsam, dass sie die Interaktion in die physische Arbeitsumgebung des Benutzers einbetten, und die sensorischen und motorischen Fertigkeiten im Umgang mit physischen Objekten integraler Bestandteil der Interaktionssprache sind. Dies geht einher mit der digitalen Erweiterung physischer Objekte und Werkzeuge sowie der Umgebung des Benutzers.

1.1.5 Dreidimensionales Skizzieren

Immersive Skizziersysteme, mit denen Designer und Konstrukteure, statt auf Papier direkt „in die Luft" skizzieren können, sind mit bekannten Technologien wie Virtual Reality und Tangible User Interfaces vergleichsweise einfach zu realisieren. Verglichen mit der Bedeutung, die Papier und Stift im Entwurfsprozess einnehmen, ist es verwunderlich, dass die Bedeutung des immersiven virtuellen Raums als Entwurfsmedium und der einzusetzenden Werkzeuge bisher kaum empirisch untersucht wurde. Das immersive dreidimensionale Skizzieren scheint jedoch in mehrfacher Hinsicht Potenzial für den Entwurfsprozess zu bieten:

Dreidimensionalität:

- Da es empirische Befunde dafür gibt, dass Menschen Objekte intern dreidimensional repräsentieren (vgl. Shepard & Metzler, 1971), erscheint das dreidimensionale Medium VR geeignet, den Externalisierungsprozess im Vergleich zu zweidimensionalen Medien besser zu unterstützen (vgl. Smallman et al., 2001). Es ist anzunehmen, dass während des dreidimensiona-

len Skizzierens weniger aufwändige mentale Transformationen und Projektionen durchgeführt werden müssen, als während des zweidimensionalen Skizzierens.

- In Produktentwicklungsprozessen werden in der Mehrzahl dreidimensionale Objekte entworfen. Ein Medium, das es Entwicklern ermöglicht, Objekte direkt dreidimensional zu erzeugen und darzustellen, erscheint daher besonders geeignet, den Produktcharakter schon in frühen Entwicklungsphasen erlebbar werden zu lassen und wesentliche Produkteigenschaften besser gestalten und darstellen zu können als mit zweidimensionalen Medien.
- Durch den Einsatz immersiver dreidimensionaler Darstellungstechniken können Entwickler in frühen Entwicklungsphasen virtuell in wechselnde räumliche Kontexte versetzt werden und darin die Wirkung von zu entwickelnden Produkten erleben.

Interaktivität:

- Digitale Interaktionstechniken, die statt abstrakter „Computerbefehle" flüssige Interaktion mittels Handbewegungen und physischer Werkzeuge ermöglichen, sollten besonders geeignet sein, kreative Entwurfsprozesse zu unterstützen.
- Mit der Unterstützung solcher kreativen Prozesse durch neue digitale Werkzeuge werden die wichtigen frühen Phasen der Produktentwicklung gestärkt.

Digitalität:

- Der Einsatz digitaler Medien in allen Entwicklungsphasen vermeidet Medienbrüche und ermöglicht so eine durchgängigere Virtualisierung des Produktenwicklungsprozesses. Die Vorteile der Virtualisierung erhalten so auch in den frühen Entwicklungsphasen ein stärkeres Gewicht.
- Der Einsatz virtueller Methoden ermöglicht die Integration von Unterstützungsfunktionen, die in physischen Medien nicht möglich ist. Kreative Prozesse können so zusätzlich angeregt werden.

Es existieren bereits verschiedene immersive dreidimensionale Skizziersysteme in unterschiedlichen Ausprägungen. Einige nutzen ausschließlich Handgesten als „Eingabe" (vgl. Hummels, 2000; Schkolne et al., 2001). Andere bieten Handwerkszeuge an, um visuell reiche und ästhetische Skizzen und Bilder zu erstellen (vgl. Keefe et al., 2001; Mäkelä & Ilmonen, 2004). Weiterhin existieren Lösungen, die mittels sogenannter Force-Feedback-Geräte haptisch unterstützte Eingabetechniken bieten (vgl. Keefe et al., 2007). Auch hybride 2D/3D-Skizzierlösungen wurden bereits vorgestellt, in denen zweidimensionale Eingaben beispielsweise mittels LCD-Touchscreens vorgenommen und 3D-Visualisierungen auf stereoskopischen Anzeigen übertragen werden (vgl. Tano et al., 2003).

Weitere immersive Modelliersysteme fokussieren auf die Erstellung von Freiformflächen, die allerdings visuell eher CAD-Modellen als Skizzen ähneln, beispielsweise fehlen ihnen illustrierende und andeutende Striche bzw. Striche verschiedener Stärke (vgl. Fiorentino et al., 2002a). Verschiedene Ansätze verfolgen darüber hinaus die automatische Erkennung und Transformation einfacher Objekte aus dreidimensionalen Skizzen zu CAD-Modelle (vgl. Pache & Lindemann,

2003; Müller, 2007; Diehl et al., 2004). Auch hier gehen jedoch wichtige Skizzeneigenschaften wie beispielsweise Unschärfe und Mehrdeutigkeit verloren.

Zur Modellierung virtueller Körper mittels auf- und abtragender Operationen entwickelten u. a. Lüddemann (1996) und Biahmou Tchebetchou (2005) Systeme zur „skizzenhaften Formgestaltung" virtueller Tonmodelle, die besondere Bedeutung in der Automobilindustrie haben. Aus ihrer Sicht ist es nicht in erster Linie die Art der visuellen Darstellung, sondern insbesondere die Leichtigkeit und Schnelligkeit des Modellierungsprozesses, die ein Medium als Skizziermedium auszeichnen.

Die Realität der industriellen Anwendung zeigt jedoch, dass immersive dreidimensionale Skizziersysteme trotz des genannten Potenzials in Produktentwicklungsprozessen kaum relevant sind. Hierfür können verschiedene Gründe verantwortlich gemacht werden:

- *Kein benutzerorientierter Entwicklungsprozess*: Bei der Entwicklung der Skizziersysteme wurden die potenziellen Anwender nicht ausreichend einbezogen, eine methodische Analyse der Anforderungen und des Anwendungskontextes solcher Systeme fand in wenigen Fällen statt. In der Mehrzahl der Fälle dienten Annahmen der Systementwickler als einzige Grundlage der Entwicklung.
- *Kaum vergleichende Studien*: Der Nutzen immersiver dreidimensionaler Skizziersysteme wurde bisher kaum in vergleichenden Studien empirisch untersucht. Einige Studien zeigen jedoch Indizien für bestimmte Vorteile, beispielsweise „direktes Skizzieren in 3D", „Möglichkeiten, die Skizze im Raum zu drehen", „intuitive Bedienung" (Müller, 2007, S. 72). Die Mehrzahl der Studien weist jedoch erhebliche methodische Mängel auf, insbesondere hinsichtlich des Versuchsdesigns, der Erhebungsmethode und der Auswertungsverfahren. Die Ergebnisse haben daher vor allem hypothesenbildenden Charakter.
- *Untersuchungen auf Künstler beschränkt*: Die zwei bisher wichtigsten empirischen Untersuchungen des dreidimensionalen Skizzierens von Mäkelä & Ilmonen (2004) und Keefe et al. (2007) waren auf Künstler beschränkt, ihre Ergebnisse sind nur sehr begrenzt auf den Produktentwicklungsprozess übertragbar.
- *Keine Integration in die Infrastruktur der virtuellen Produktentwicklung*: Die Integration des dreidimensionalen Skizzierens in die technologische Infrastruktur der virtuellen Produktentwicklung steht noch aus (vgl. Müller, 2007). Insbesondere stellen sich Herausforderungen im Bereich der elektronischen Datenformate und des Workflows im Entwurfsprozess. Eine nahtlose Nutzung herkömmlicher CAD- und dreidimensionaler Skizziersysteme ist daher bisher nicht möglich, die Nutzungsbarrieren sind entsprechend hoch.
- *Hohe Anschaffungskosten*: Die Kosten der technologischen Infrastruktur dreidimensionaler Skizziersysteme liegen nach wie vor um ein Vielfaches höher als die von Desktop-CAD-Arbeitsplätzen.
- *Das Fehlen marktreifer kommerzieller Systeme*: Dadurch können die tatsächlichen Vor- und Nachteile des dreidimensionalen Skizzierens nicht hinreichend im realen Produktentwicklungsprozess untersucht werden.

Zusammenfassend erscheint ein methodisch fundierter, benutzerorientierter Entwicklungsprozess nötig, um die Potenziale des immersiven dreidimensionalen Skizzierens im Produktentwicklungsprozess entfalten zu können.

1.2 Ziele

Das Ziel dieser Arbeit ist es, das immersive dreidimensionale Skizzieren als Unterstützungswerkzeug kreativer Entwicklungs- und Gestaltungsprozesse in den frühen Phasen der Produktentwicklung zu verankern (vgl. Abbildung 2). Dazu soll das Skizzieren im dreidimensionalen, virtuellen Raum mittels fühlbarer (engl. *tangible*) Werkzeuge ermöglicht werden. Entwickler und Konstrukteure sollen dadurch in ähnlicher Weise wie beim Skizzieren mit Papier und Stift Linien direkt in den Raum zeichnen können. Die entstehenden dreidimensionalen Skizzen sollen interaktiv aus verschiedenen Perspektiven betrachtet und verändert werden können

Das Forschungsfeld wird in dieser Arbeit aus der Perspektive der Mensch-Maschine-Interaktion betrachtet. Im Unterschied zu vorangegangenen Untersuchungen soll in dieser Arbeit ein benutzerorientierter Prozess verfolgt und empirische Verfahren eingesetzt werden, um Möglichkeiten und Grenzen des dreidimensionalen Skizzierens herauszuarbeiten. Aufbauend auf den Ergebnissen vorangegangener Arbeiten, die insbesondere den Modellierungsaspekt skizzenhafter Formgestaltung (vgl. u. a. Lüddemann, 1996; Kehler, 1998; Stork, 2000; Biahmou Tchebetchou, 2005) oder das Denk- und Darstellungshandeln beim überwiegend papierbasierten Skizzieren untersuchten (vgl. u. a. Dylla, 1991; Sachse, 2002; Römer, 2002; Pache, 2005), werden im Rahmen dieser Arbeit grundlegende Fragen zur Gestaltung der Interaktionsschnittstelle zwischen Mensch und virtuellem Raum untersucht.

Die zentralen Forschungsfragen dieser Arbeit sind:

1. Welchen Nutzen erwarten die avisierten Designer und Konstrukteure von immersiven dreidimensionalen Skizziersystemen (Studie 1)?
2. Erschließt das dreidimensionale Skizzieren im Vergleich mit dem zweidimensionalen Skizzieren qualitativ neue Unterstützungsfunktionen für kreative Entwurfsprozesse? Wo liegen Vor- und Nachteile? (Studie 2)
3. Wie wirkt sich die Gestaltung der Interaktionswerkzeuge und der Schnittstelle zwischen Anwender und virtueller Umgebung auf die Lösung einfacher Interaktionsaufgaben (Studie 3) und komplexer Skizzieraufgaben aus (Studie 4)?
4. Welche Gestaltungs- und Einsatzempfehlungen können für dreidimensionales Skizzieren gegeben werden? (Kapitel 10)

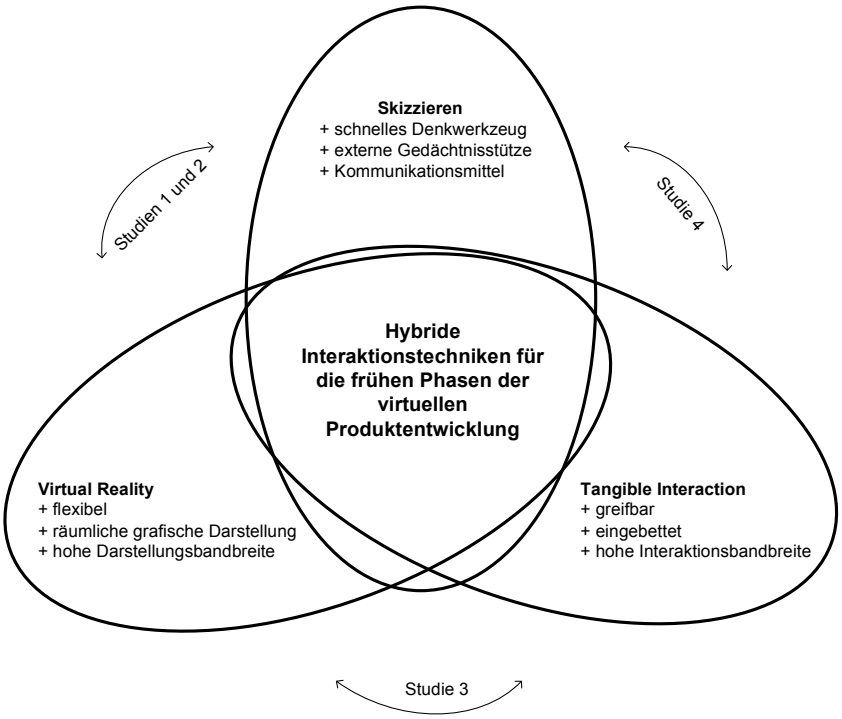


Abbildung 2: Integrationsziel dieser Arbeit.

1.3 Methodisches Vorgehen: User Centered Design

Sowohl die inhaltliche Ausrichtung als auch das Vorgehen dieser Arbeit orientieren sich am Konzept des benutzerorientierten Designs interaktiver Systeme (engl. User Centered Design, UCD; DIN EN ISO 13407, 2000). Dieses stellt eine hohe Gebrauchstauglichkeit (engl. *usability*) als primäres Gestaltungsziel in das Zentrum der Entwicklung, also Effektivität, Effizienz und Benutzerzufriedenheit beim Lösen einer Aufgabe mittels eines interaktiven technischen Systems (vgl. DIN EN ISO 13407, 2000). Das User Centered Design formuliert einerseits *Prinzipien*, die sicherstellen sollen, dass eine benutzerorientierte Sichtweise in allen Phasen eines Systementwurfs einfließt, hierzu zählen die *aktive Einbeziehung der Benutzer*, ein *iteratives* Vorgehen bei der Lösungsentwicklung und *multidisziplinäre* Zusammenarbeit, in die das Wissen um menschliche Fähigkeiten und Fertigkeiten, ergonomische Faktoren und Wissen über vorhandene Techniken einfließen. Andererseits beschreibt UCD einen iterativen *Prozess* mit vier Gestaltungsaktivitäten, in denen die avisierten Benutzer jeweils maßgeblich beteiligt sind (vgl. Abbildung 3):

1. *Analyse und Verstehen des Nutzungskontextes*: Dazu zählen die Fertigkeiten und Merkmale der avisierten Benutzer, die Arbeitsaufgaben und -ziele, für die das System eingesetzt, und die Umgebung, in der das System benutzt werden soll. Dieser Analyseprozess sollte theoretisch und empirisch untermauert werden.

2. *Ableitung von Benutzeranforderungen und organisatorischen Anforderungen an das Gesamtsystem*: Hierbei soll auch eine geeigneten Funktionsaufteilung zwischen Benutzern und dem technischem System festgelegt werden, d. h. welche Funktionen vom technischen System und welche vom Benutzer erfüllt werden sollen.
3. *Entwurf von Gestaltungslösungen*: Hier werden Prototypen erstellt, um Gestaltungskonzepte früh mit avisierten Benutzern zu diskutieren und deren Rückmeldungen in die Weiterentwicklung einfließen zu lassen.
4. *Beurteilung der Gesamtlösung*: In Benutzertests, durch Urteile von Fachleuten und ggf. durch Langzeitstudien kann eingeschätzt werden, ob die Benutzer- und organisatorischen Anforderungen erfüllt wurden; ggf. können Verbesserungsvorschläge abgeleitet werden. Nur wenn die Anforderungen ausreichend erfüllt wurden, kann die Entwicklung abgeschlossen werden, andernfalls wird eine weitere Iteration des Entwicklungsprozesses durchlaufen.

Das strukturierte Vorgehen des User Centered Design trägt nach Rauterberg (2003) dazu bei, möglichst viele benutzerrelevante Designkriterien im Gestaltungsprozess zu berücksichtigen. Unter Verweis auf verschiedene Fallstudien nennt Rauterberg insbesondere erhöhte Qualität und Produktivität, reduzierten Aufwand für Support und Training sowie verbesserter Benutzergesundheit und -sicherheit als unmittelbare Vorteile des UCD, die sich auch ökonomisch niederschlagen (vgl. Rauterberg, 2003; Rauterberg, 2000). Viele Autoren erweitern den Fokus des User Centered Design jedoch über den Aspekt der reinen Gebrauchstauglichkeit hinaus auf alle Aspekte des Benutzererlebens, wie beispielsweise ästhetische, affektive, emotionale und kreativitätsfördernde Faktoren (vgl. u. a. Shneiderman, 2000; Hummels et al., 2001; Hassenzahl, 2004; Hekkert & Leder, 2008; Mahlke, 2008). Flämisch (2004) unterstreicht die Notwendigkeit, im UCD nicht ausschließlich Benutzeranforderungen zu berücksichtigen, sondern auch technische Innovationen einfließen zu lassen. Damit die entwickelten Ideen in realisierbare Lösungen einfließen können, sollte außerdem deren technische Umsetzbarkeit im Blick behalten werden. Timpe und Kolrep (2002) und Rötting und Seifert (2005) schlagen hierzu eine systematischen Funktionsallokation zwischen Benutzer und technischem System vor. Dazu werden aus einer Gesamtsicht auf das Mensch-Maschine-System die zu lösenden Aufgaben entweder dem technischen System oder dem Menschen übertragen.

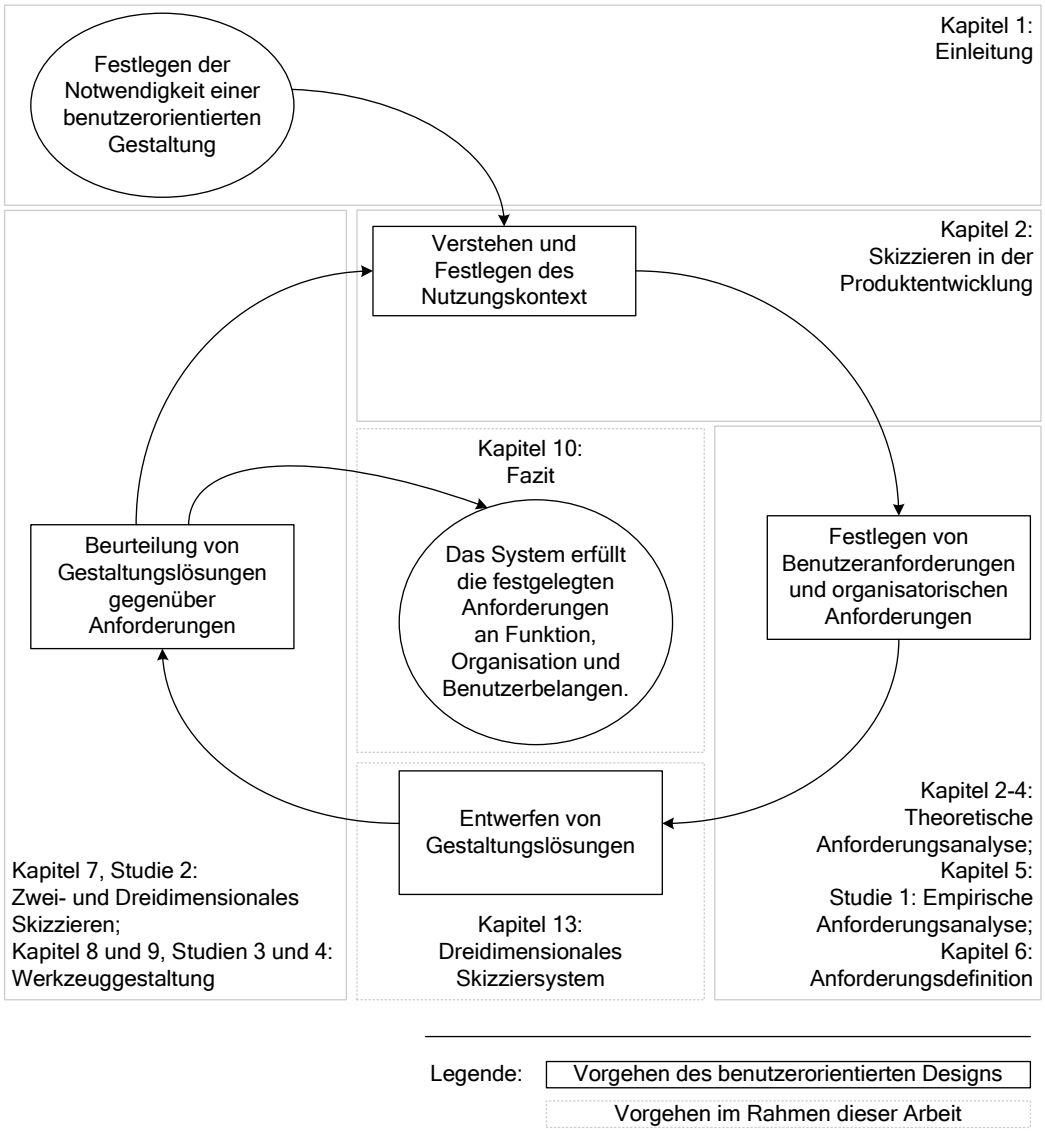


Abbildung 3: Benutzerorientierter Gestaltungsprozess interaktiver Systeme (aus DIN EN ISO 13407, 2000, S. 6) und Vorgehen im Rahmen dieser Arbeit.

1.4 Wissenschaftlicher Beitrag und Gliederung

Entsprechend eines benutzerorientierten Vorgehens wird das Skizzieren in dieser Arbeit zunächst im Kontext der Produktentwicklung theoretisch diskutiert, dabei wird u. a. die Domäne des Möbeldesigns dargestellt, die in den späteren Studien als Beispieldomäne dient (Kapitel 2). Es werden typische Eigenschaften von Skizzen und des Skizzierprozesses erläutert und die besondere Bedeutung des Skizzierens zur Unterstützung des „opportunistischen“ und adaptiven Vorgehens während der frühen Produktentwicklungsphasen herausgearbeitet.

Die Analyse und Definition der Benutzeranforderungen und der organisatorischen Anforderungen beginnen in Kapitel 3 zunächst mit einer Darstellung der kognitiven Unterstützungsfunktionen des Skizzierens, insbesondere des Externalisierens innerer Bilder, der nahtlosen Kombination innerer und äußerer Bilder und der Entlastung des Arbeitsgedächtnisses. Anschließend werden die Faktoren kreativen Denkens und Handelns diskutiert, insbesondere der Einfluss von Umwelt, Werkzeugen und Medien.

Kapitel 4 beginnt mit einer Analyse der wesentlich am Skizzieren beteiligten Sinneskanäle und motorischen Funktionen. Im Sinne eines balanced design nach Flämisch (2004) werden hier auch die technologischen Möglichkeiten und Grenzen aktueller Virtual Reality-Technologie diskutiert. Als Lösungsmöglichkeiten zur Überwindung von Interaktionsbarrieren werden hybride Objekte vorgeschlagen, die über einen greifbaren, physischen Anteil und einen virtuellen, nicht greifbaren Anteil verfügen. Dieses dem Tangible Interaction (vgl. u. a. Ishii & Ullmer, 1997; Hornecker & Buur, 2006) entlehnte Konzept wird auf einem neuen Kontinuum zwischen virtuellen, hybriden und physischen Objekten eingeordnet, das sich am Mixed Reality Kontinuum für virtuelle Umgebungen von Milgram und Kishino (1994) orientiert.

In Kapitel 5 wird die Anforderungsanalyse mit einem empirischen Teil abgeschlossen (Studie 1). Dazu werden in einer qualitativen Befragung avisierter Benutzer einbezogen, hier 14 Designer und Konstrukteure aus der Beispieldomäne Möbelentwicklung. Mittels Fokusgruppen können dadurch empirisch fundierte Vorteile des immersiven dreidimensionalen Skizzierens prognostiziert werden. Dabei werden insbesondere Räumlichkeit, Eins-zu-eins-Proportionalität, Assoziativität und Formbarkeit der Skizzen genannt. Weiterhin werden gewünschte Funktionsgruppen ermittelt. Es ergibt sich ein Bild, wonach die Unterschiede des Skizzierens, des Modellierens mittels physischer Modelle und des herkömmlichen CAD-Modellierens den befragten Designern und Konstrukteuren zwar bewusst sind, sie in immersiven Skizziersystemen aber möglichst alle Funktionen vereinigt sehen wollen.

Aufbauend auf den Ergebnissen der Anforderungsanalyse werden in Kapitel 6 Hypothesen für die nachfolgenden empirischen Studien formuliert. Diese beziehen sich sowohl auf das Unterstützungspotenzial immersiver Skizziersysteme für kreative Entwurfsprozesse als auch auf grundsätzliche Richtlinien für die Gestaltung von Werkzeugen des immersiven Skizzierens.

In Kapitel 7 wird erstmals zwei- und dreidimensionales Skizzieren unter technisch identischen Bedingungen vergleichend untersucht (Studie 2). Als technische Infrastruktur wird, wie auch in den Studien 3 und 4, eine fünfseitige VR-CAVE mit 2,5 m Kantenlängen, stereoskopischer Darstellung und magnetischem Trackingverfahren eingesetzt. In der empirischen Studie mit 24 Versuchspersonen, vorwiegend berufserfahrene Designer und Konstrukteure, können signifikante Unterschiede gefunden werden, die die Unterstützungsfunktion des dreidimensionalen Skizzierens stützen. Hier sind insbesondere die interaktive Auseinandersetzung des Skizzierenden mit der Skizze schon während der ersten Darstellungshase, die Eins-zu-eins-Räumlichkeit sowie stimulierende hedonistische Faktoren zu nennen. Die qualitative Analyse der Benutzeräußerungen ergab darüber hinaus Hinweise auf technische Herausforderungen und Notwendigkeiten zur Weiterentwicklung.

Kapitel 8 widmet sich der Frage der Interaktion mit hybriden Objekten im immersiven virtuellen Raum zunächst unabhängig vom Kontext des Skizzierens (Studie 3). Diesem Vorgehen liegt die bei Entwicklung und Evaluation von VR-Interaktionstechniken übliche Annahme zugrunde, dass aufgrund der Benutzerperformance in basalen Interaktionsaufgaben wie Rotation und Positionierung, sogenannten canonical manipulation tasks, Aussagen über die Benutzerperformance in komplexen Interaktionsaufgaben wie dem Skizzieren getroffen werden können (vgl. u. a. Bowman et al., 2004). Die vergleichende Studie mit 36 Versuchspersonen zeigt erstmals die Vor- und Nachteile hybrider Interaktionsobjekte im Vergleich zu rein physischen und rein virtuellen Objekten. Bisher waren nur die Letzteren Gegenstand vergleichender Untersuchungen (vgl. Ware & Rose, 1999). Es kann gezeigt werden, dass hybride Interaktionsobjekte gegenüber rein physischen Objekten in Positionierungsaufgaben und gegenüber virtuellen in Rotationsaufgaben vorteilhaft sind und stimulierender wirken.

Aufbauend auf diesen Ergebnissen wird in Kapitel 9 die grundsätzliche Gestaltung von Skizzierwerkzeugen untersucht (Studie 4). In einer empirischen Untersuchung mit 24 berufserfahrenen Designern und Konstrukteuren kann gezeigt werden, dass unter den gegebenen technischen Bedingungen hybride Interaktionswerkzeuge von den Benutzern als stimulierend angesehen werden. Die qualitative Auswertung der Benutzeräußerungen ergibt, dass die Teilnehmer hybride Interaktionswerkzeuge als pragmatischste, d. h. den Aufgaben am weitesten angemessene Variante empfinden.

Kapitel 10 schließt mit dem Fazit und benennt weiteren Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Es werden ein Systemansatz und Workflow vorgestellt, in denen ein flüssiger und adaptiver Übergang zwischen immersivem dreidimensionalen Skizzieren und dem Arbeiten an CAD-Systemen ermöglicht wird.

Die Erweiterung der Funktionalität bestehender dreidimensionaler Skizziersysteme war nicht das vorrangige Ziel dieser Arbeit. Im Rahmen dieser Arbeit wurde jedoch ein Prototyp entwickelt, der in den Studien 3 und 4 zum Einsatz kam. Dieser wird in Anhang 12.1 (S. 274) vorgestellt. Einige neue Funktionen des Prototyps, wie ein passives haptisches Feedback durch die physische Gestaltung des Stifts, ein sogenannter „History Slider“ zur Rekapitulation des Skizzierprozesses und ein Bézierwerkzeug zur Erstellung von Freiformflächen, werden darin ebenfalls beschrieben.

Die Ergebnisse dieser Arbeit unterstreichen die Unterstützungsfunktion des immersiven dreidimensionalen Skizzierens für kreative Entwicklungs- und Gestaltungsprozesse, der deutlich für einen industriellen Einsatz dieser Technologie spricht. Außerdem wird durch diese Arbeit die weitere Forschung zum dreidimensionalen Skizzieren auf eine empirisch fundierte Grundlage gestellt.

2
Skizzieren in frühen Produktentwicklungsphasen

Entwickeln, Entwerfen und Erfinden heißt, sich von Gewohntem zu befreien,
es analysieren und anders kombinieren zu können, bisher Bekanntes
zu verbinden und bisher Verbundenes zu trennen. Konstruieren
beinhaltet Originalität, indem neue Vorstellungsverbindungen
intuitiv oder methodisch geschaffen werden
Spur & Krause (1997, S. 13)

Die größten Freiräume, innovative Produktideen und kreative Lösungsansätze in die Entwicklung von Produkten einzubringen, bestehen in den frühen, konzeptionellen Phasen des Produktentwicklungsprozesses. Hier werden die Grundlagen für den Erfolg von Produkten gelegt (vgl. Hacker, 2007). Typischerweise werden Skizzen gerade in den frühen Phasen verwendet, Hacker schreibt ihnen hier eine „leistungsbestimmende" Rolle zu (Hacker, 2002, S. 19). Dagegen werden CAD-Werkzeuge in den frühen, explorativen Phasen noch „mit Zurückhaltung" genutzt (Spur & Krause, 1997, S. 413). Trotz zahlreicher viel versprechender Arbeiten (vgl. u. a. Lüddemann, 1996; Kehler, 1998; Biahmou Tchebetchou, 2005) wird das Unterstützungspotenzial durch digitale Werkzeuge in den frühen Phasen der Produktentwicklung bisher nicht ausgeschöpft.

Zu Beginn des Kapitels werden zunächst der Begriff der Skizze definiert und weitere Formen der „skizzierenden Formgestaltung" (Lüddemann, 1996) eingeführt. Um das Potenzial neuer skizzenbasierter Unterstützungsmethoden zu verdeutlichen, wird anschließend die Bedeutung der frühen Produktentwicklungsphasen diskutiert. Abschließend wird das Skizzieren als Methode des Industrial Designs dargestellt.

Das folgende Kapitel 3 widmet sich den Unterstützungsfunktionen des Skizzierens aus der Perspektive des kreativen Lösungshandelns.

2.1 Skizzieren in den frühen Phasen der Produktentwicklung

2.1.1 Skizzieren als Unterstützungsmethode der Produktentwicklung

Bock beschreibt das Konstruieren als „schöpferisches und lückenloses Vorausdenken eines technischen Gebildes, das den Anforderungen (...) entspricht, und Schaffen aller zweckmäßigen Unterlagen für seine stoffliche Verwirklichung“ (Bock, 1955, S. 504f; zit. n. Römer, 2002, S. 10). Komplexe und anspruchsvolle Konstruktions- und Designaufgaben sind formal nicht vollständig beschreibbar, da sie von vielen unterschiedlichen Variablen wie beispielsweise Industrienormen beeinflusst werden (Schön, 1983, S. 79). Konstruieren ist daher oft von hoher Ergebnisunsicherheit gekennzeichnet und kann nicht routinemäßig bearbeitet werden (vgl. Römer, 2002).

Bei der Lösung konstruktiver Entwurfsprobleme (engl. *design problem solving*) stellen Skizzen ein elementares Hilfsmittel dar (Abschnitt 3.1.1, S. 34), da sie das Vorausdenken von Problemlösungen und das Überwinden von Barrieren beim Suchen nach prinzipiellen Lösungen unterstützen (vgl. Römer, 2002; Müller, 2007; Ponn et al., 2004). Nach Hacker kann „die leistungsbestimmende Rolle einer Beteiligung des externen Vorgehens“ wie beispielsweise des Skizzierens „beim Entwickeln für die Lösungserzeugung [insgesamt] als gesichert gelten.“ (Hacker, 2002, S. 19).

Skizzen sind „im Regelfall freihändig erstellte, nicht unbedingt maßstäbliche Zeichnungen“ (vgl. DIN 199-1, 2002) und meist die ersten bildlichen Modelle, die der Konstrukteur oder Designer von einem Produkt erstellt (vgl. Lippardt, 2000). Sie bestehen typischerweise aus einigen Strichen zur Verdeutlichung von Anordnungen, Prinzipien oder Formen und dienen unter anderem dazu, funktionale, räumliche und konstruktive Strukturen „skizzenhaft abzutasten“ (Sachse, 2002, S. 39). Ferguson (1993; zit. n. Sachse, 2002, S. 41) unterscheidet drei Typen von Skizzen:

- *Denkskizzen* zum Führen und Fokussieren des Entwurfsdenkens
- *vorschreibende Skizzen* als Grundlage zur Erstellung technischer Zeichnungen und anderer vollständiger bildlicher Produktmodelle
- *sprechende Skizzen,* die während der Diskussion zwischen Konstrukteuren oder Konstrukteuren und Kunden entstehen.

Skizzieren und die vielfältigen durch Skizzieren unterstützten Funktionen sind fester Bestandteil aller gängigen Vorgehensmodelle. Pahl & Beitz (2005) verorten das Skizzieren in mehreren Phasen ihres Produktentwicklungsmodells:

- in der *Aufgabenplanungs- und Klärungsphase* zum Finden und Auswählen von Produktideen,
- in der *konzeptionellen Phase* zur Konkretisierung prinzipieller Lösungsvarianten und
- der *entwerfenden Phase* zur Grobgestaltung der Form, Auswahl geeigneter Grobentwürfe und Feingestaltung des vorläufigen Entwurfs.

In empirischen Untersuchungen realer Konstruktionsprozesse konnte Römer (2002) zeigen, dass Skizzen vor allem als primäre Hilfsmittel *der Lösungsentwicklung, Lösungsüberprüfung, Analyse,*

längerfristigen Dokumentation und *Kommunikation* mit anderen an der Produktentwicklung beteiligten Personen genutzt werden (vgl. Römer, 2002).

Die große Bedeutung von Zeichnungen und speziell des Skizzierens für erfolgreiche Produktentstehungsprozesse ist mehrfach empirisch belegt worden. Die Flüssigkeit der Entwurfshandlungen und die hohe Geschwindigkeit, mit der Produktbilder mittels Skizzen erstellt und ausgearbeitet werden können, gelten neben anderen als vorrangige Gründe für ihre Bedeutung (Kapitel 3). Skizzen weisen hier gegenüber CAD-Systemen wesentliche Vorzüge auf. So stellten beispielsweise Hwang (1990) und Birkhofer (1994) in unabhängigen Studien fest, dass von allen im Produktenstehungsprozess erstellten Zeichnungen 60 Prozent Skizzen sind. Hinsichtlich der zeitlichen Gewichtung konnte Dylla (1991) in empirischen Untersuchungen beobachten, dass in 80 Prozent der Zeit, die Konstrukteure für die Erstellung schriftlicher oder bildlicher Lösungen verwenden, Skizzen entstehen. In Römers (2002) Untersuchungen gab über die Hälfte der befragten Konstrukteure an, vor dem Einsatz von CAD-Werkzeugen häufig oder immer Skizzen zu erstellen. Rund 40 Prozent der Befragten täte dies auch während der Arbeit an CAD-Werkzeugen. Römer konnte auch beobachten, dass Konstrukteure zur Lösungsentwicklung nicht bereit waren, auf Skizzen zu verzichten, in der Mehrzahl CAD-Systeme jedoch nicht vermisst hätten. Auch Staples (1995) und Pache (2005) konnten beobachten, dass Konstrukteuren gerade dann, wenn sie CAD-Software einsetzen, auch parallel Skizzen auf Papier angelegen. In empirischen Untersuchungen konnte Eisentraut (2000) außerdem feststellen, dass durch den Einsatz von CAD-Systemen die manuell vergleichsweise zeitaufwändig zu erstellenden technischen Zeichnungen verdrängt werden, Skizzen ihre Bedeutung jedoch nicht verlieren.

Trotz der zunehmend durchgängigen Verwendung digitaler dreidimensionaler Produktmodelle in industriellen Produktentstehungsprozessen stellen Skizzen nach wie vor die Grundlage aller Konstruktionsschritte dar. Der Entwurf der VDI Norm 2209 zur „3-D-Produktmodellierung" bezeichnet Produkt-„Gesamtskizzen" daher als der Grundlage und Referenz der schrittweisen 3D-Modellierung (VDI-2209, 2006).

Zusammenfassend lässt sich festhalten:

- Skizzen sind nach wie vor ein unverzichtbarer Bestandteil realer Produktentwicklungsprozesse.
- Skizzen werden universell zur Lösung verschiedener Aufgaben eingesetzt.
- Skizzieren wird durch den Einsatz von CAD-Systemen nicht verdrängt.

2.1.2 Eigenschaften von Produktskizzen und des Skizzierprozesses

Sowohl Produktdesigner als auch Konstrukteure fertigen in den frühen Entwicklungsphasen Strichskizzen an, die sowohl *gestalt- und geometriebeschreibende*, als auch *schematische, symbolische* und *verbale Elemente* enthalten (vgl. Abbildung 4). In experimentellen Untersuchungen mit 61

berufserfahrenen Konstrukteure und Maschinenbaustudenten konnte Pache (2005) aufzeigen, dass je mehr verschiedenartige Elemente in einer Skizze enthalten sind, desto stärker deren Unterstützungsfunktion und Informationsgehalt für den weiteren Konstruktionsprozess sind. Der Aufbau einer Skizze folgt demnach syntaktischen Regeln, nach denen sich die Elemente aufeinander beziehen. Obwohl die Skizzenelemente, ähnlich wie die Elemente verbaler Sprachen, sequentiell erstellt werden, stehen sie in keiner eindimensionalen Beziehung zueinander. „Es gibt vielfältige Wege und Richtungen eine Skizze zu ‚lesen' und eine Änderung der Leserichtung kann zur Reinterpretation der Skizze und zu schwerwiegenden Änderungen des Lösungskonzepts führen." (Pache, 2005, S. 100)

Daraus lässt sich folgern:

- Skizzen sind sowohl für Designer als auch für Konstrukteure bedeutsame Unterstützungswerkzeuge zur Fixierung von Produktbildern.
- Skizzen unterstützen das schrittweise Modellieren von Produkteinzelteilen mittels CAD.
- Skizzen können in verschiedenen Richtungen gelesen und reinterpretiert werden.

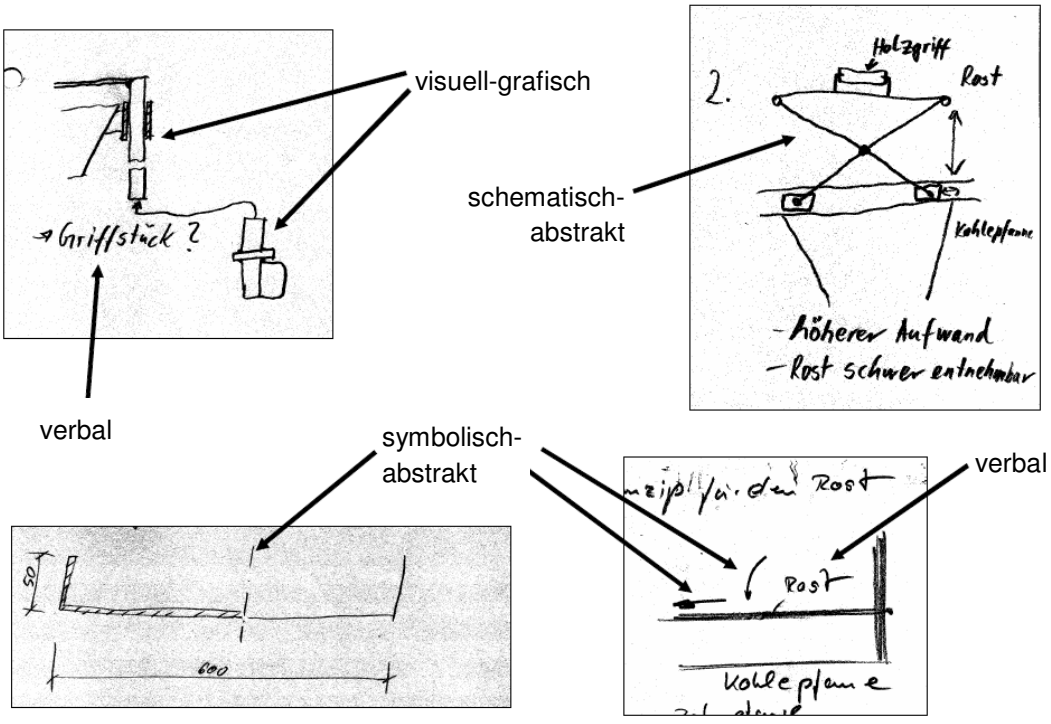


Abbildung 4: Beispiele verschiedener Skizzenelemente (nach Pache, 2005, S. 82).

Skizzieren sollte keineswegs ausschließlich als Externalisierung bereits mental vorhandener Ideen verstanden werden. Suwa & Tversky (Suwa & Tversky, 1996; Tversky, 2003) verweisen darauf, dass die primären Unterstützungsfunktionen des Skizzierens durch den skizziertypischen Selbstkommunikations-*Prozess* aus Externalisieren und Reflektieren bewirkt werden (Kapitel 3), in dem Designer ihre Ideen entwickeln, neue Bezüge entdecken und Ansätze für neue Produktfeatures erkennen (Reflecting-in-action, Schön, 1983). Auch für Buxton (2007) wird die katalytische kreative Wirkung des Skizzierens vorrangig durch die *Tätigkeit* des Skizzierens und die Auseinandersetzung des Designers mit seinen Lösungsideen bewirkt, und weniger durch die *Skizze* als Ergebnis des Prozesses. Die charakteristischen und unerlässlichen Eigenschaften von Produktskizzen und des Skizzierprozesses hat Buxton in elf Kategorien zusammengefasst (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Charakteristische Eigenschaften von Produktskizzen, nach Buxton (2007, S. 111f).

Prozess des Skizzierens	**Schnell**: Skizzen sind schnell zu erstellen, bzw. wird der Prozess als schnell wahrgenommen.
	Zeitlich verfügbar: Skizzen können erstellt werden, wann immer sie gebraucht werden, um beispielsweise eine Idee zu fixieren oder zu kommunizieren.
	Geringe Kosten: Skizzen sind billig zu erstellen. Ideen sollten nicht aus Kostengründen nicht fixiert und fallen gelassen werden, insbesondere nicht in den frühen Entwicklungsphasen.
	Verwerfbarkeit: Wenn man nicht in der Lage ist, eine Skizze wegzuwerfen, nachdem sie ihren Zweck erfüllt hat, handelt es sich vermutlich nicht um eine Skizze; der Wert einer Skizze liegt im Konzept, nicht in deren Ausarbeitung und Detailgenauigkeit.
Ergebnis des Skizzierens	**Viele Varianten existieren nebeneinander**: Konzepte werden in der Regel durch mehrere miteinander im Kontext stehende Skizzen transportiert.
	Charakteristische Skizziersprache: Skizzen weisen charakteristische bildliche Eigenschaften auf, so verlaufen Linien z. B. über End- und Schnittpunkte hinaus, und es sind Linien vorhanden, die keine formdefinierende Funktion haben.
	Skizzierstil: Skizzen sind häufig nicht präzise und „eng" gezeichnet, sondern haben einen besonderen „Schwung", der das Gefühl „Offenheit und Freiheit" vermittelt.
	Wenig Details: Skizzen enthalten nur das, was nötig ist, um das Konzept erkennbar werden zu lassen; zu viele Details können den Anschein vermitteln, das Konzept sei weiter entwickelt als es tatsächlich ist.
	Wenige Festlegungen: Stil und Auflösung der Skizze sollten keinen Entwicklungsstand suggerieren, den das Konzept noch nicht erreicht hat; eine Skizze sollte nicht aufwändiger erstellt sein als das Konzept, das sie transportieren soll.
	Vorschlagscharakter: Skizzen schlagen eher vor als dass sie bestätigen; sie regen zum kreativen Denken an.
	Mehrdeutigkeit: Skizzen können oft auf verschiedene Art interpretiert und in Verbindung gesetzt werden, selbst durch die Person, die sie erstellt hat; hierin liegt eine der primären Unterstützungsfunktionen des Skizzierens begründet.

Hummels (2000) und Lüddemann (1996) erweitern das Verständnis des Skizzenbegriffs um alle Medien, die eine „skizzierenden Formgestaltung“ ermöglichen: „Die skizzierende Formgestaltung ist ein Prozess des Modellierens strukturierter geometrischer Formen, der mit wenigen Gestaltungstätigkeiten das Wesentliche einer Form verdeutlicht.“ (Lüddemann, 1996, S. 38) Hummels unterscheidet drei typische Medien des Skizzierens und skizzierenden Modellierens (vgl. Hummels, 2000):

Zeichnungen: Fast jeder Designer nutzt Zeichnungen als schnelle, intuitive und ausdrucksstarke Möglichkeit, Ideen zu generieren, zu präsentieren und zu evaluieren. Zur Erstellung von Zeichnungen werden verschiedene Werkzeuge genutzt, beispielsweise Fineliner, Markierungsstifte, Bleistifte verschiedener Härtegrade, Zeichenstifte und Pinsel (vgl. Besterfield & O'Hagan, 2007; Heuser, 1994). Das Werkzeug wird beim Skizzieren zur „natürlichen Erweiterung der Hand“ (vgl. Hummels, 2000), es wird in der Weise „zuhanden“ (vgl. Winograd & Flores, 1986; Heidegger, 1927), dass der Zeichnende das Werkzeug nicht mehr bewusst wahrnimmt, sondern „durch es hindurch“ mit dem Medium interagiert. Der Gebrauch von Papier und Stift erlaubt feine Änderungen der Skizze hinsichtlich des Farbtons, der Maserung und Strichbreite und -durchgängigkeit.

Collagen werden hauptsächlich in der ersten Phase der Ideenfindung genutzt. Anders als Zeichnungen, die vor allem die bildliche Vorstellung vom Produkt unterstützen, werden Collagen genutzt, um mit großen Wirkungen und starken Effekten die „Atmosphäre“ des Produktgebrauchs, der Eindrücke der Benutzer, der Umgebung aber auch abstrakter Gefühle, die durch das Produkt induziert werden sollen, „einzufangen“. Collagen bestehen meistens aus Fotografien und Abbildungen, z. B. aus Zeitschriften, die vom Designer auf Papier neu ausgerichtet werden, bis die „richtige“ Komposition gefunden ist (vgl. Hummels, 2000).

Mit *Physischen Modellen* können räumliche Form, Interaktionskonzepte und Herstellbarkeit eines Produkts evaluiert werden. Sie reichen von simplen Papier-Mock-Ups bis hin zu voll funktionsfähigen Prototypen, welche die interaktiven Aspekte eines Produkts auf verschiedene Weise abbilden. Arbeitsmethoden der Herstellung physischer Modelle, Werkzeuge, Material und das resultierende Modell sind eng miteinander verknüpft. Beispiele hierfür sind:

- Papiermodelle, erstellt beispielsweise mittels Schere, Klebstoff und Papierklammern,
- Tonmodelle, erstellt mittels Spachteln, Kratzern und Bürsten, oder
- detaillierte Prototypen aus Holzfaserplatten (MDF), Aluminium oder synthetischem Material, die an Drehbänken, mit Bohrmaschinen oder Schleifmaschinen hergestellt werden.

Verschiedene Werkzeuge, beispielsweise Spachtel, ermöglichen dem Designer durch das Werkzeug hindurch direkt am Modell zu arbeiten und das Modell mit den Händen zu spüren (vgl. Winograd & Flores, 1986; Hummels, 2000).

▷ Neben Papierskizzen werden Collagen und physische Modelle als Medien des skizzenhaften Modellierens und Skizzierens eingesetzt.

2.2 Innovative und kreative Freiheitsgrade der frühen Entwicklungsphasen

Skizzen werden hauptsächlich in den frühen Produktentwicklungsphasen eingesetzt. Die Bedeutung des Skizzierens erklärt sich daher zu einem wesentlichen Teil aus der Bedeutung der frühen Entwicklungsphasen. Um Skizzieren in diesem Kontext verstehen zu können, sollen in diesem Abschnitt die frühen Phasen und ihr Innovationspotenzial dargestellt werden. Insbesondere wird dabei auf das Industrial Design eingegangen, in dem Skizzen eine zentrale Rolle spielen. Weiterhin wird in diesem Abschnitt gezeigt, dass reale Entwicklungsprozesse keinem streng formalen Vorgehen folgen, sondern stattdessen häufig zwischen abstrakten und konkreten Lösungsniveaus wechseln, die von systematischen Perioden begleitet werden. Skizzen scheinen zur Unterstützung dieses Vorgehens besonders geeignet.

In der industriellen Praxis verlaufen Tätigkeiten des Marketing, der Entwicklung und Konstruktion sowie der Fertigungsplanung im Sinne eines Simultaneous Engineering (vgl. u. a. Albers, 1994) zunehmend zeitlich parallel und unter starker Einbeziehung von Zulieferern. Zeitlich aufeinander folgende Produktentwicklungsphasen lassen sich somit immer schwerer ausmachen (Abschnitte 2.2.1, S. 21, und 2.2.2, S. 25). Trotzdem soll der Begriff „frühe Phasen“ hier für die Tätigkeiten verwandt werden, in denen die informativen, prinzipiellen und ersten gestalterischen Festlegungen von Produkteigenschaften erfolgen. Darin liegen nach Hacker (2007) die größten Potenziale, um Produktinnovationen zu initiieren (Abschnitt 2.2.3, S. 26f).

2.2.1 Methodisches Konstruieren

Ein materielles Produkt[1] zu konstruieren bedeutet, durch denkendes Entwerfen die Voraussetzungen für seine stoffliche Realisierung zu schaffen und diese zu fixieren (vgl. Hacker, 1998; Spur & Krause, 1997). Der Entwickler muss dabei Anforderungen aus *technisch-physikalischer, funktionaler, fertigungstechnischer, wirtschaftlicher* und *umweltbezogener* Sicht lösen und in realisierbare Produktmodelle überführen (vgl. Spur & Krause, 1997; Seeger, 2005; Pahl et al., 2005)

Mit dem Ziel, Produktentwicklungs- und Konstruktionsprozesse analytisch zu erschließen und systematisch zu verbessern, wurden vielfältige Heuristiken aufgestellt. Diese heben den Entwicklungsprozess von einem rein intuitiven Vorgehen ab, bei dem sich der Entwickler seiner Handlungsabfolgen im Wesentlichen nicht bewusst ist und diese damit zur Reflektion und Verbesserung nicht zur Verfügung stehen (vgl. Bedeutung des Begriffs „intuitiv“ im Bereich Mensch-Maschine-Interaktion in Mohs et al., 2006b).

Pahl und Beitz (2005) gliedern den Entwicklungsprozess in die vier Phasen *des Erfassens und Klärens* der Aufgabenstellung, des *Konzipierens,* des *Entwerfens* und des *Ausarbeitens*. Spur und Krause (1997) stellen das Produkt ins Zentrum ihrer Methodik und bilden alle Produkt-„Lebensphasen“ in einem Produktentstehungsprozess ab. Darin setzt sich die Produktentwicklung aus Produktplanung, -konstruktion und -erprobung zusammen. Timpe und Kohlrep (2002) verfolgen einen systemtechnischen Ansatz, in dem die optimale Funktionsteilung zwischen Mensch und Maschine im Vordergrund steht. Im Bereich des Usability Engineering beschreiben

[1] lat. Begriff für „das Hervorführen“

unter anderem Mayhew (1999) und die DIN-ISO 13407 (2000) iterative Prozesse zur Einbeziehung des Benutzers, seines Umfeldes und seiner Tätigkeiten in die benutzerorientierte Entwicklung vorrangig von Softwaresystemen und deren Benutzungsschnittstellen. Weitere Entwicklungsmethoden wurden unter anderem von Müller (1990) und Ehrlenspiel (1995) eingeführt. Als maßgebliche und integrative „Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte" gilt die VDI 2221 (1993). In Anlehnung an die vier Phasen des Referenzprozesses von Pahl und Beitz (2005) definiert sie sieben Arbeitsabschnitte, zwischen denen in Auswahl- und Entscheidungsschritten vor- oder gegebenenfalls zurückgesprungen wird, die jeweils Zwischenergebnisse produzieren und an deren Ende die Herstellung des Produkts steht (vgl. Abbildung 5).

Die im Referenzprozess von Pahl und Beitz (2005) beschriebenen Phasen sind in den meisten Produktentwicklungsmodellen zu finden und lassen sich mit unterschiedlicher Gewichtung sowohl auf *Neu-* als auch auf *Anpassungs-* und *Variantenkonstruktionen* anwenden. In der ersten Phase, der *Klärung der Aufgabenstellung,* werden Informationen beschafft, aufgrund derer Anforderungen und Bedingungen an das zu entwickelnde Produkt erstellt und in Anforderungslisten festgehalten werden. In der anschließenden *Konzeption* des Produkts müssen die wesentlichen Probleme der Aufgabenstellung erkannt und dafür geeignete Funktionsstrukturen entwickelt und entsprechende Wirkprinzipien gesucht werden. Hierzu heben Pahl und Beitz (2005) neben der Analyse bestehender technischer und von der Natur inspirierter Lösungen insbesondere die Notwendigkeit intuitiv betonter, kreativer Methoden hervor (siehe Kapitel 3). Im Ergebnis entsteht eine prinzipielle Lösung, mit der den Produktanforderungen entsprochen werden kann. In der anschließenden Phase des *Entwerfens* erfolgt die gestalterische Festlegung der Lösung nach technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten. Typischerweise werden wiederholt mehrere vorläufige Entwürfe erstellt und verglichen, „um zu einem besseren Informationsstand über Vor- und Nachteile der Varianten zu gelangen" (a. a. O., S. 52). In Zwischenstufen werden einzelne Varianten favorisiert und weiterentwickelt, beziehungsweise miteinander kombiniert. Am Ende dieser Phase entsteht ein endgültiger Gesamtentwurf, der die funktionalen Anforderungen als erfüllbar darstellen kann und den prinzipiellen Gestaltungsrichtlinien beispielsweise nach Ergonomie-, Formgebungs- und Montagegerechtigkeit genügt. Abgeschlossen wird die Produktentwicklung mit der *Ausarbeitung* einer herstellungsgerechten Festlegung der Lösung, in der alle Produktdetails endgültig verbindlich fixiert werden. Oft treten bei der Ausarbeitung und Detaillierung Schwierigkeiten auf, die eine Widerholung verschiedener Phasen erfordern, in der Regel jedoch nur auf der Ebene von Bauteilen oder Einzelheiten.

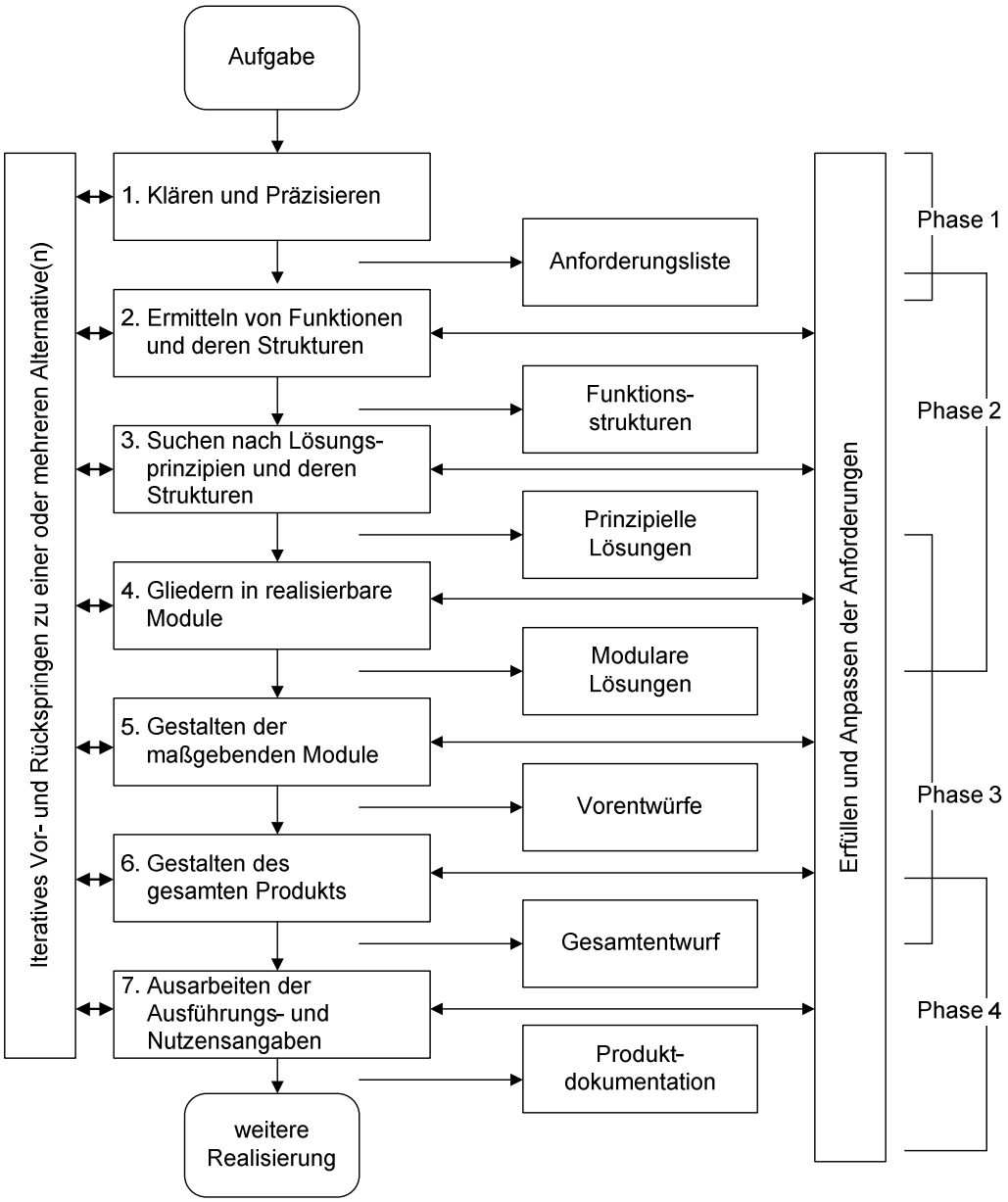


Abbildung 5: Generelles Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren nach VDI 2221 (1993, S. 9).

Als Vorzüge des schrittweisen, methodischen Vorgehens gegenüber dem intuitiv geleiteten sehen Pahl und Beitz (2005, S. 55):

- die Vermeidung häufig unbewusst vollzogener nachteiliger Verkürzungen oder das Überspringen von Lösungsschritten;
- die Sicherheit, nichts Wesentliches unberücksichtigt gelassen zu haben;
- einen breiten Überblick über mögliche Lösungswege zu gewinnen, insbesondere bei Neukonstruktionen;
- das methodische Vorgehen als Möglichkeit einzusetzen, wenn bessere Ergebnisse gefordert werden und intuitiv keine Lösung erkennbar ist.

Trotz der genannten und unbestrittenen Vorteile üben eine Vielzahl von Autoren Kritik an einem rein methodischen, phasenreinen Verständnis des Konstruierens und Entwerfens. Dies einerseits, weil es individuelle Problemlöseprozesse nicht ausreichend berücksichtige. Anderseits werden die sich aus der Einführung von rechnergestützten Konstruktionstechniken ergebenden Veränderungen nicht angemessen berücksichtigt. So warnt Hacker (2007) vor einer „falsch verstandenen Interpretation der VDI 2221" (S. 1), nach der schöpferisches und kreatives Entwurfsproblemlösen in starren Phasen erfolgte und der Gesamtauftrag vollständig systematisch in Teilaufgaben und Teilziele zerlegt würde, für welche erschöpfend alle möglichen Lösungsmöglichkeiten ermittelt und abgewogen würden. Statt dessen ist kreatives Problemlösen gekennzeichnet von zahlreichen Vorgriffen und Rücksprüngen, die in der VDI zwar erwähnt werden (vgl. VDI-2221, 1993, S. 5, S. 11; und Pahl et al., 2005, S. 53f), jedoch nicht ausreichend vertieft und systematisch integriert sind. Hacker (2002) bezeichnet ein „opportunistisches Vorgehen mit systematischen Episoden" (a. a. O., S. 14) als optimale Vorgehensstrategie, da dieses den kognitiven Möglichkeiten und Grenzen des Entwicklers bestmöglich entspricht: „Vorgehensteile, die durch vermutlich brauchbare Einfälle zu einem Teilziel getrieben sind [wechseln] mit Abschnitten eines systematischen Zerlegens und rationalen Nachdenkens" (Kapitel 3, insbesondere Abschnitt 3.1.1, S. 34). Auch Müller (1990) rät davon ab, methodenbewusstes Problemlösen als die „einzige effektive Form intelligenter Operationen" darzustellen (Müller, 1990, S. 27). Müller betont, dass „intellektueller Fortschritt" nur durch „adaptives Vorgehen" zu erreichen ist, das weder sequentiell noch zyklisch erfolgt. „Bei erfolgreichen Entwicklungsingenieuren ist ausgeprägt Parallelarbeit in verschiedenen Ebenen, zu mehreren Teilproblemen, zwischen denen sie sich *oszillierend* bewegen, zu beobachten." (a. a. O., S. 12). Ein solches oszillierendes Vorgehen beobachteten auch Rutz (1985), Dylla (1991) und Lippardt (2000). Sie stellen fest, dass sich in praktischen Konstruktionsprozessen ein Wandel vom Abstrakten zum Konkreten nur sehr langsam vollzieht und dominiert wird von vielfältigen kurzfristigen Wechseln zwischen Arbeiten an abstrakten und konkreten Modellen (vgl. Abbildung 6).

Hieraus lässt sich folgende Anforderung ableiten:

- Unterstützungsmethoden des Konstruierens sollten „opportunistisches" und adaptives Vorgehen berücksichtigen, das von kurzfristigen Wechseln zwischen konkreten und abstrakten Betrachtungen geprägt ist.

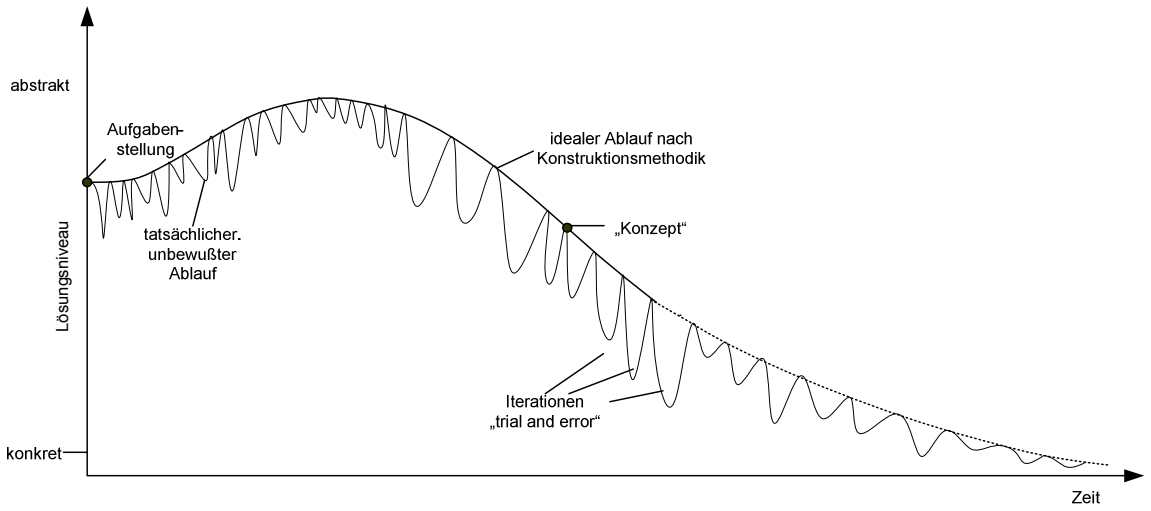


Abbildung 6: Praktische Konstruktionsprozesse sind gekennzeichnet durch eine stetige aber langsame Konkretisierung der Lösungsidee, die sich in kurzfristigen oszillierenden Wechseln zwischen abstrakten und konkreten Modellen vollzieht (nach Rutz, 1985, S. 106).

2.2.2 Prozesse der Virtuellen Produktentwicklung

Das *Virtuelle Produkt* nach Spur und Krause (1997) ist ein „nur in der Möglichkeit vorhandenes Produktmodell“, welches das wirkliche Produktverhalten abbildet und in Rechnersystemen gespeichert werden kann. Die *Virtualisierung* des Konstruktionsprozesses ist dessen Transformation in einen „rechnerintegrierten Ablauf“, der die Möglichkeit zur Darstellung und Manipulation des Produktverhaltens ermöglicht und schließlich alle zur Erstellung des Produkts notwendigen Informationen bereitstellt (a. a. O., S. 47, 403). Die Virtuelle Produktentwicklung (VPE) kann danach in virtuelle und reale Phasen unterteilt werden, die gekennzeichnet sind durch die Arbeit mit realen, physischen beziehungsweise digitalen, virtuellen Produktmodellen und Werkzeugen. Am Ende des Prozesses stehen alle zur Erzeugung des Produkts notwendigen Informationen zur Verfügung (a. a. O., S. 403).

Im Sinne eines produkt- und prozessintegrierenden Vorgehens schlagen Spur und Krause das Konzept des „Segmentierten Totalen Produktmodells“ vor. Dieses repräsentiert alle relevanten produktbeschreibenden Informationen in verschiedenen Modellen, unter denen das Anforderungs-, Konzept- und Konstruktionsmodell den frühen Entwicklungsphasen zuzuordnen sind. Sämtliche Modelle werden durch ein Produktstrukturmodell integriert. Produkt- und geschäftstypische Prozesse können in Prozessmodellen abgelegt werden, wodurch eine Flexibilisierung des Produktentwicklungs- und -entstehungsprozesses erreicht wird, ohne dass wertvolles Prozesswissen verloren geht.

Ansätze zur Aufteilung des Produktmodells in physische und funktionale Aspekte sowie in anwendungsorientierte und anwendungsneutrale Basismodelle finden sich auch im STEP-Standard für den Austausch von Produktmodelldaten (vgl. ISO-10303, 1994). Dieser stellt den De-facto-Industriestandard der Virtuellen Produktentstehung dar und ermöglicht die Integration von

VPE-Methoden und -Werkzeugen wie CAD und CAM und die Kooperation über heterogene Systeme und Unternehmensgrenzen hinweg (vgl. Krause et al., 2004). In realen industriellen Anwendungen entsteht an diesen heterogenen Systemschnittstellen jedoch nach wie vor erhebliche Integrationsaufwand, der halbautomatisiert oder meist manuell von menschlichen „Kümmerern" verrichtet wird, ohne die die Virtuelle Produktentwicklung vielerorts noch nicht gelänge (vgl. Stark & Krause, 2008).

Unter Berücksichtigung der Kritik an einem rein methodischen, phasenreinen Verständnis der Produktentwicklung sollen die Entwicklungsphasen im weiteren Verlauf dieser Arbeit lediglich zur groben Kennzeichnung von Entwicklungstätigkeiten mit phasentypischen Schwerpunkten verwendet werden. Im Fokus dieser Arbeit stehen dabei klärende, konzipierende und entwerfende Tätigkeiten. Als maßgeblich für das konkrete Entwicklungshandeln wird ein „opportunistisches" Vorgehen[1] des Konstrukteurs oder Designers im Rahmen seines Aufgabenbereiches unterstellt, das sich durch den Einsatz virtueller Methoden in wesentlichen Teilen parallelisieren lässt.

2.2.3 Innovationspotenzial der frühen Entwicklungsphasen

Die Möglichkeiten, Einfluss auf Produkteigenschaften zu nehmen, sind in den frühen klärenden und konzipierenden Phasen am vielfältigsten, sie werden daher auch als die „produktbestimmenden Phasen" bezeichnet (Spur & Krause, 1997, S. 427). Produktinnovationen müssen daher hier initiiert und methodisch verankert werden (vgl. Hacker, 2007).

Kehler (1998) nennt insgesamt vier Funktionseinheiten typischer arbeitsteiliger Produktplanungs- und Konzeptionsprozesse, aus denen heraus Produktinnovationen initiiert werden können. Neben marketing-, fertigungs- und technikgetriebenen Produktinnovationen sind es *designgetriebene Produktinnovationen*, die durch intuitiv gefundene ästhetisch motivierte Produktideen Planungs- und Konzeptionsprozesse neuer Produkte anstoßen.

In den frühen Entwicklungsphasen liegt jedoch ein wesentlicher Konflikt. Zwar bestehen hier einerseits die höchsten Freiheitsgrade in Entwicklungsentscheidungen und damit auch die meisten Möglichkeiten, Produkteigenschaften, wie beispielsweise Herstellungs- und Gebrauchskosten, zu beeinflussen. Andererseits liegen im Vergleich zum gesamten Entwicklungszyklus in den frühen Phasen naturgemäß die wenigsten Informationen über die Auswirkungen der Entscheidungen auf das Endprodukt vor (vgl. Abbildung 7). Dadurch werden Entscheidungen erschwert und Produktfehler können unentdeckt bleiben (vgl. u. a. Wozny, 1992; Ehrlenspiel, 1995; Spur & Krause, 1997; Buxton, 2007). Zur Unterstützung der Entwicklungstätigkeiten in den Findungs-, Konzeptions- und Entwurfsphasen werden daher Methoden eingesetzt, die bereits frühzeitig das Produktwissen erweitern (engl. *frontloading*), indem sie (vgl. Spur & Krause, 1997, S. 427):

---

[1] Das „opportunistische Vorgehen mit systematischen Episoden" beschreibt Problemlöseprozsse, in denen der Entwickler sein Vorwissen fallbasiert anwendet und situativ handelt. Zwar verfolgt der Entwickler ein übergeordnetes Ziel, beschreitet jedoch keinen durchgängig systematischen Weg zur Lösungsfindung. Stattdessen werden Teilziele verfolgt und so gelöst, wie es in der Situation angemessen („opportun") erscheint. In regelmäßigen „systematischen Episoden" erfolgt eine Rückbindung und Überprüfung des aktuellen Handelns an das Gesamtziel. (Abschnitt 3.1.1, S. 34f)

- Expertenwissen und Kontextinformationen bereitstellen,
- Produkteigenschaften simulieren und berechnen,
- Feedback aus dem Produktlebenszyklus einfließen lassen,
- die frühzeitige Bewertung und Optimierung von Produkteigenschaften ermöglichen und
- den Entscheidungsprozess systematisch unterstützen.

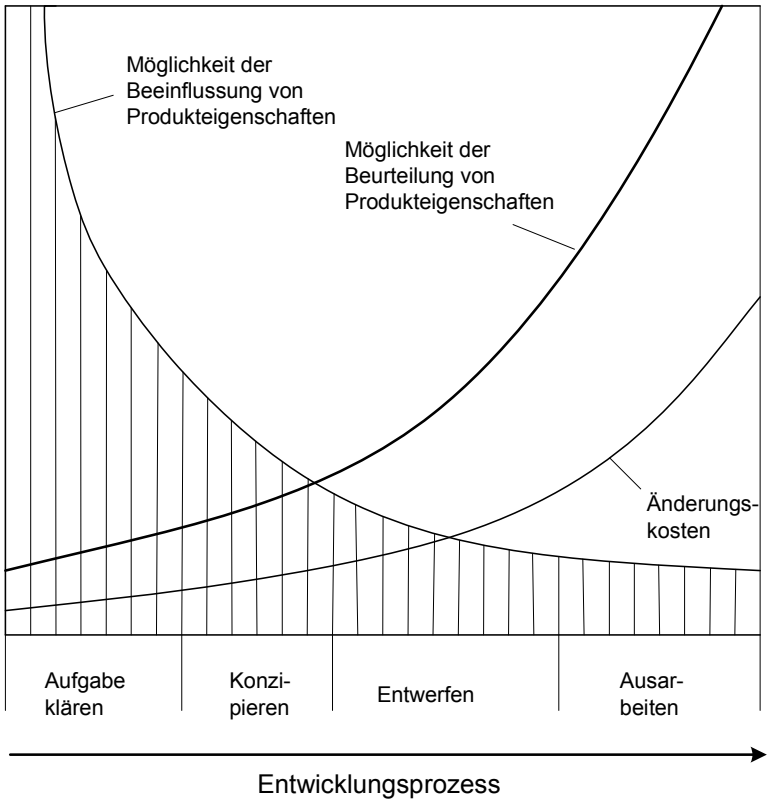


Abbildung 7: Möglichkeiten der Beeinflussung und Beurteilung von Produkteigenschaften im Konstruktionsprozess (nach Ehrlenspiel, 1995, S. 561).

Zur „schnelleren, gezielteren und vollständigeren" Informationsbereitstellung empfehlen Spur und Krause (1997, S. 426) den Einsatz virtueller Methoden. Sie verweisen jedoch darauf, dass diese bisher nicht in der Lage sind, „die Kreativität in der frühen Entwurfsphase, gekennzeichnet durch skizzenhaftes Arbeiten, (...) ausreichend (zu) unterstützen." (a. a. O., S. 413).

Ergänzend zu den im Abschnitt 2.2.2 (S. 25) genannten Unterstützungsmethoden wie geometrischen und funktionalen Modelliersystemen, wissensbasierten Systemen und Simulationssystemen besteht demnach ein Bedarf an virtuelle Methoden, die skizzenhaftes Arbeiten unterstützen. Sie können als ein wichtiger Baustein der virtuellen Produktentwicklung gelten.

▷ Es besteht ein hoher Bedarf an virtuellen Methoden, die das skizzenhafte Arbeiten unterstützen. Bereits existierende virtuelle Methoden werden dadurch ergänzt, jedoch nicht ersetzt.

Auch Buxton (2007) regt an, Skizziermethoden einzusetzen, um den Entscheidungsspielraum in den frühen Phasen besser ausschöpfen zu können. Mittels dieser einfachen, schnellen und kostengünstigen Technik sollten möglichst viele Produkteigenschaften bereits zu Beginn der Ideenfindung visualisiert und iterativ weiterentwickelt werden (vgl. Abbildung 8). Durch umfangreiches Skizzieren kann demnach die Qualität der Entwürfe und somit auch die Qualität der nachfolgend zu erstellenden Modelle und Prototypen[1] wesentlich gesteigert werden. Hieraus leitet Buxton (2007) eine wichtige ökonomische Funktion des Skizzierens ab, da Prototypen, deren Fertigung im Vergleich zu Skizzen aufwändig und kostenintensiv ist, nur in geringerer Zahl erstellt werden müssen.

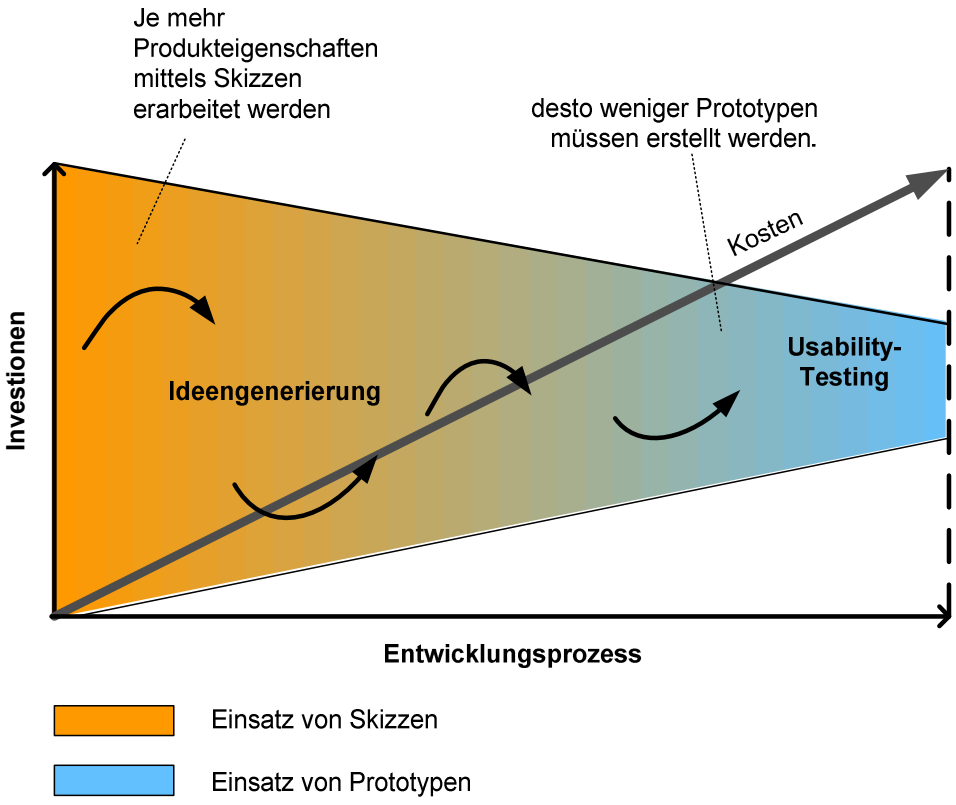


Abbildung 8: Einsatz von Skizzen zur Ideenfindung und von Prototypen zum Testen von Produktfunktionen (nach Buxton, 2007, S. 138).

[1] Buxtons (2007) benutzt den Prototypen-Begriff pauschal für alle funktionalen Produktmodelle und schließt darin analoge Prototypen (z. B. Papierprototypen) und digitale Prototypen (z. B. Software-MockUps) ein. Prototypen im Sinne industrieller funktionsäquivalente Gebrauchsmuster werden von Buxton nicht adressiert.

2.3 Prozesse des Produktdesign - Designintegrierte Produktentwicklung

Um den sich vielfältig ändernden Marktanforderung zu entsprechen (Abschnitt 2.1, S. 16), wird - getrieben von der Konsumgüterindustrie - eine verstärkte Einbindung des Designprozesses in den Gesamtprozess der Produktentwicklung gefordert (vgl. Kehler, 1998). *Design* (auch Industrial Design, Product Design, Technical Design) wird typischerweise zum einen als diejenige „Qualität einer Produktgestalt (verstanden), die ihre Betätigbarkeit und Benutzbarkeit sowie ihre Sichtbarkeit und Erkennbarkeit durch den Menschen (Käufer, Benutzer u. a.) beinhaltet" (Seeger, 2005, S. 3), zum anderen als *Prozess* der „Entwicklung (Konzeption, Entwurf und Ausarbeitung) einer Produktgestalt im Rahmen einer systematischen und konstruktiven Produktentwicklung" (ebd.). Die VDI 2424 beschreibt Design als eine „Metadisziplin, die (…) Impulse aus Verfahrens- oder Anwendungsideen in ästhetische Form und Funktionen transformiert." (VDI-2424, 1988). In Anlehnung an Kehler (1998) und Koppelmann (1993) wird Design hier als „planvolle und mit starken ästhetischen Bezügen ausgeführte Gestaltung eines industriell zu fertigenden Produkts" (Koppelmann, 1993; zit. n. Kehler, 1998, S. 6) definiert, um sowohl den planvollen, analytischen Anteil als auch den breiten ästhetischen Spielraum der Designtätigkeit hervorzuheben.

Eine arbeitsteilige Trennung vorwiegend technisch und ästhetisch orientierter Tätigkeiten durch Konstrukteure und Designer ist kennzeichnend für die Entwicklung technischer Produkte und spiegelt sich unter anderem in der getrennten Ausbildung beider Fachrichtungen wieder. Ansätze zur Integration bieten unter anderem Seeger (2005), Kehler (1998), Uhlmann (2005) und die VDI 2424 (1988) an (vgl. Tabelle 2). Letztere unterstellt zwar unterschiedliche Schwerpunkte des Industrial Design und der Konstruktion, betont aber, „in den Mitteln, den Methoden und dem Produktziel" (VDI-2424, 1988, S. 8) seien beide identisch. Daher könne auch der „Ablaufplan für das methodische Konstruieren" (a. a. O., S. 7) dazu genutzt werden, Tätigkeiten des Designs darzustellen. Die VDI 2424 setzt Schwerpunkte und mögliche Verantwortungsbereiche des Industrial Design insbesondere:

- in den klärenden und planenden Phasen zur Ideenfindung,
- in den konzipierenden Phasen zur Anforderungsanalyse, zum Bilden von Strukturschemata, zum Herausarbeiten von Formkonzepten und zum Bewerten des Designs,
- in den entwerfenden Phasen zur Formerzeugung und
- in den ausarbeitenden Phasen zur Entwicklung von Ansichtsmodellen.

Auch Seeger (2005) versteht den Designprozess als eingebettet in den konstruktiven Gesamtprozess und dessen „Ablauf und Dauer (…) sinnvollerweise in die gleichen Phasen wie den konstruktive Entwicklungsprozess gegliedert" (S. 79). In einem solchen „integralen Gestaltungsprozess" (S. 78) wirken sich die Anforderungen an das Produkt auf alle Gestaltungsbereiche aus. Als integrierende Elemente schlägt Seeger vor:

- in den klärenden und planenden Phasen: Anforderungslisten zu verwenden, die auch Designanforderungen hinsichtlich Benutzbarkeit, Sichtbarkeit und Erkennbarkeit enthalten

- in den konzipierenden Phasen: Aus den designintegrierten Anforderungslisten abgeleitete Konzeptanforderungen zu erstellen, die in Konzepte zu Funktionsbaugruppen, Tragwerks- und Bedienungselementen einfließen
- in den entwerfenden Phasen: Aus den designintegrierten Anforderungslisten Entwurfsanforderungen abzuleiten und Formentwürfe der genannten dreidimensionalen Gestaltungselemente (Funktionsbaugruppen, Tragwerks- und Bedienungselemente) zu erstellen
- in den ausarbeitenden Phasen: Aus den Anforderungslisten Ausarbeitungsanforderungen abzuleiten und anhand derer das Design der Oberflächen und Farben sowie konkretisierte Grafiken des Aufbaus und der Form der dreidimensionalen Gestaltungselemente zu erstellen

Kehler (1998) empfiehlt dreidimensionale Konzeptskizzen als Integrationswerkzeug zwischen Design, Konstruktion und Marketing in den frühen Entwicklungsphasen und legt dabei den Schwerpunkt auf die ästhetische Konzeption. Dreidimensionale Konzeptskizzen nach Kehler werden halbautomatisiert aus perspektivisch gezeichneten Produktskizzen generiert und mittels VR-basierter Methoden dargestellt. Sie unterstützen in der planenden Phase die Entwicklung und spätere Eingrenzung von Themen und Szenarien für zukünftige Produkte, insbesondere zwischen Design und Marketing. In der konzipierenden Phase sind dreidimensionale Skizzen vorgesehen, um im Austausch zwischen Design und technischen Disziplinen verschiedene Konzeptvorschläge zu erarbeiten und zu analysieren. Im Sinne eines Concurrent Engineering ermöglichen dreidimensionale Projektskizzen als Kommunikationsmedium demnach ein paralleles Erarbeiten und anschließendes Verfeinern von Designkonzept und technischem Konzept. Nach mehreren Verfeinerungsrunden wird im „Concept-Freeze" ein Designkonzept verabschiedet und mittels dreidimensionaler Skizzen dokumentiert. In Fallstudien konnte Kehler die Akzeptanz der Methode nachweisen und deren Kosten- und Zeiteinsparungspotenzial bestätigen.

Im „Vorgehensplan Designprozess" gleicht Uhlmann (2005) basierend auf Expertiseergebnissen den methodischen Ablauf des Technischen Designs (TD) mit dem des methodischen Konstruierens ab. Der Schwerpunkt der kooperativen Entwicklungstätigkeit liegt hier in den planenden und konzipierenden Phasen. Hier liegt es in der Verantwortung des Technischen Designs, die Aufgaben und Ziele der Entwicklung zu bestimmen und das „Wesen" des technischen Objekts festzulegen. Daraufhin werden Designkonzept und Leitgedanken der Entwicklung festgelegt. Als letzte konzeptionelle Schritte sieht Uhlmann den hypothetischen Gesamtentwurf, der Ausführungsüberlegungen des Leitgedanken zeichnerisch festhält, beispielsweise in Form maßstäblicher, annotierter Skizzen (hier ein modular aufgebautes Flugmodell in verschiedenen Modellkonfigurationen). Diese Zeichnungen haben bereits die Reife patentierbarer Lösungen. Für Uhlmann ist es bestimmend, dass technische Objekte „ob man will oder nicht *erlebt* werden (…) und eine ästhetische Bewertung erfahren" (a. a. O., S. 9, Hervorhebung im Original), die in die „Ganzheit der subjektiven Bewertung" (ebd.) einfließt. Da nach Uhlmann Designexperten bereits intuitiv nach dem beschriebenen Vorgehensplan verfahren, ist dieser insbesondere als ein Instrument der Ausbildung anzusehen.

Tabelle 2: Integration des Designprozesses in den konstruktiven Gesamtprozess.

Produkt-entwicklungs-phase	**Aufgabe des Designs** (VDI-2424, 1988)	**Designbezogene Anforderungen und Ergebnisse** (Seeger, 2005)		**Designintegrierte Produktentwicklung** (Kehler, 1998)	**Vorgehensplan Designprozess des Technischen Designs** (Uhlmann, 2005)	**Abstrahierte Charakterisierungen** (Laseau, 1980; Mischok et al., 1992; Pugh, 1990)
		Anforderungs-definition	Ergebnisse			
Planen	Ideenfindung Trend und Marktanalyse Vorentwicklung	Designintegrierte Anforderungslisten		Entwicklung und Eingrenzung von Produktthemen und -szenarien	Aufgabe klären Designkonzept klären Hypothetischer Gesamtentwurf	divergent/elaborierend konvergent/reduzierend
Konzipieren	Anforderungsanalyse Konzeption des Strukturschemas Formkonzeption Designbewertung	Design-Konzept-Anforderungen	Funktionsbaugruppen, Tragwerks- und Bedienungselemente	Ästhetische Konzeption Konzeptanalyse Kommunikation	Aufgabenspezifische Zergliederung in Teilziele Technische Funktionsstruktur Technische Prinziplösungen	divergent/elaborierend konvergent/reduzierend
Entwerfen	Formerzeugung Wertanalyse	Design-Entwurfs-Anforderungen	Formentwürfe der genannten dreidimensionalen Gestaltungselemente	Konzeptverfeinerung Dokumentation Concept-Freeze	Baumodule Beschaffen oder Entwerfen und Konstruieren	divergent/elaborierend konvergent/reduzierend
Ausarbeiten	Entwicklung von Prototypen und Ansichtsmodellen	Design-Ausarbeitungs-Anforderungen	Design der Oberflächen, Farben, konkretisierte Grafiken des Aufbaus und der Form		Gestaltung Gesamtentwurf	divergent/elaborierend konvergent/reduzierend Vorbereitung Serienentwicklung

Der Designprozess wird vereinfachend oft auch als zweiphasiger Prozess beschrieben (vgl. u. a. Laseau, 1980; Mischok et al., 1992). In der ersten, *divergenten* oder *elaborierenden Phase* werden ausgehend von einzelnen Lösungsideen im intuitiven Diskurs Varianten und alternative Designkonzepte entwickelt (vgl. Abbildung 9). Primäre Medien sind hier perspektivische Skizzen und farbige Zeichnungen (vgl. Lüddemann, 1996). Der Auswahl eines oder mehrerer Designkonzepte folgt dann in einem *konvergenten* oder *reduzierenden* Prozess die Verfeinerung und Eingrenzung der Lösungsmöglichkeiten hin zur Entscheidung für ein endgültiges Formmodell. Medien dieser Phasen sind Skizzen, plastische Modelle und insbesondere im Automobilbau Packagepläne und Tapepläne. Letztlich schließt die Serienentwicklung den Designprozess ab. Pugh (1990; zit. n. Buxton, 2007) schlägt in ähnlicher Weise wie Rutz (1985) eine flexiblere Darstellung des Designprozesses vor, in der sich divergente und konvergierende Episoden in jeder Entwicklungsphase wieder finden, also in jeder Phase trotz wachsender Detaillierung zunächst Konzepte generiert (engl. *concept generation, CG*) und anschließend ausgewählt werden (engl. *controlled convergence, CC*).

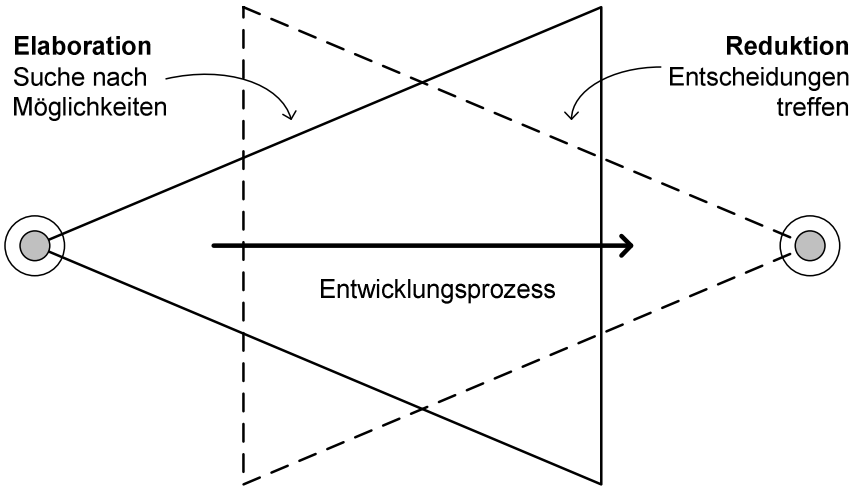


Abbildung 9: Vereinfachende Darstellung des Designprozesses mit überlappenden konvergenten, elaborierenden und konvergenten, reduzierenden Episoden (aus Laseau, 1980; zit. n. Buxton, 2007, S. 144).

Die beschriebenen Vorgehensmodelle des Industrial Design sind ebenso wie die des methodischen Konstruierens nicht allgemeingültig und allumfassend. In realen branchen-, unternehmens- und produktspezifischen Entwicklungsprozessen sind wesentliche Unterschiede auszumachen. Zwei Entwicklungsprozesse des Fahrzeug- und Möbeldesigns werden im Anhang 12.1 (S. 274) und 12.2 (S. 276) exemplarisch vorgestellt.

2.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden Skizzen als Unterstützungsmedien des Entwurfsproblemlösens eingeführt und ihre Eigenschaften dargestellt. Hervorgehoben wurden insbesondere die Einfachheit und Schnelligkeit der Erstellung, ihr charakteristischer Stil und ihr Vorschlagscharakter. Digitale Skizzierwerkzeuge sollten die typischen Unterstützungsfunktionen des analogen Skizzierens ebenfalls anbieten und um zusätzliche Unterstützungsfunktionen erweitern, die sich nur mit digitalen Technologien realisieren lassen.

Anschließend wurden das methodische Konstruieren und die designintegrierte Produktentwicklung beschrieben. Hier lag der Fokus auf der Balance zwischen einerseits dem methodischen, anderseits dem intuitiven Vorgehen, welches zwischen phasentypischen Tätigkeiten springt und Kennzeichen erfolgreicher Konstruktions- und Entwicklungsprozesse ist. Neue Entwurfswerkzeuge sollten ein adaptives, zwischen konkreten und abstrakten Betrachtungen wechselndes Vorgehen ermöglichen.

Im folgenden Kapitel werden nun die Unterstützungsfunktionen des Skizzierens aus der Perspektive des kreativen Lösungshandelns dargestellt. In den Kapiteln 4 und folgende werden anschließend Möglichkeiten der Unterstützung des kreativen Skizzierens mittels MR Technologien vorgestellt.

3
Skizzieren als elementares Werkzeug kreativer Entwurfsprozesse

Aber weil ich doch irgend eine dunkle Vorstellung habe,
die mit dem, was ich suche, von fern her in einiger Verbindung steht,
so prägt, wenn ich nur dreist damit den Anfang mache,
das Gemüt, während die Rede fortschreitet,
in der Notwendigkeit, dem Anfang nun auch ein Ende zu finden,
jene verworrene Vorstellung zur völligen Deutlichkeit aus, dergestalt,
dass die Erkenntnis, zu meinem Erstauen, mit der Periode fertig ist.
Heinrich von Kleist (1805; 2002)

Vor dem Hintergrund zahlreicher empirischer Arbeiten stellt sich das Skizzieren als effektives Werkzeug kreativen Handelns und Problemlösens dar. Die dem Skizzieren innewohnenden Prozesse des Externalisierens innerer Bilder durch motorische Bewegungen und materielle Darstellungen sowie deren Reflektion liefern wichtige „Bausteine" für kreatives Denken und Handeln und unterstützen so das Problemlösen. Pierre Sachse (2002, S. 70) geht sogar soweit zu fragen, ob die „allmähliche Verfertigung der Gedanken beim Skizzieren und Modellieren oder einem anderen motorischen Tun" als „grundsätzliches, allgemeines Prinzip der Gestaltwerdung" bezeichnet werden kann.

Im diesem Kapitel werden die das Skizzieren bestimmenden Prozesse und das Konzept Kreativität zunächst unabhängig dargestellt und dann zueinander in Beziehung gebracht. Das Kapitel schließt mit einem Transfer in die Domäne kreativitätsunterstützender Werkzeuge.

3.1 Psychologische Grundlagen des Skizzierens und Konstruierens

Die Skizze ist ein Alltagsmedium, das häufig eher beiläufig genutzt wird, um inneren bildlichen Modellen durch Darstellungshandlungen eine äußere Form zu geben und sie zu bearbeiten. Für Konstrukteure, Ingenieure, Künstler und viele andere Berufsgruppen ist Skizzieren eine Arbeitsmethode, die eng mit frühen kreativen, Problem-erfassenden und -lösenden Prozessen verbunden ist. Die erste äußere Form eines Gedankens findet sich oft in Form einer Skizze. Skizzen sind darin der menschlichen Sprache ähnlich, ebenso wie diese weisen sie syntaktische Strukturen auf und erlauben die Konstruktion von Darstellungen mit hoher semantischer Tiefe (Abschnitt 2.1.2, S. 17; Pache 2005).

Skizzieren als Prozess und die Skizze als dessen (Zwischen-)Ergebnis können als fundamentale Katalysatoren kreativen Handelns wirken, die an keine Anwendungsdomäne gebunden sind. Die kognitiven Unterstützungsfunktionen des Skizzierens wirken auf basale Gedächtnis-, und Handlungsvorgänge. In Bezug auf seinen reflexiven Charakter wird Skizzieren häufig als Selbstkommunikationsprozess (Pache, 2005: Selbstgespräch) des Subjekts mit sich selbst beschrieben (vgl. u. a. Schön, 1983; Sachse, 2002; Pache, 2005; Buxton, 2007). Die so entstehende Verbindung des Denkens und Handelns, die „Objektivierung" innerer Bilder in der äußeren Realität, die Entlastung des Arbeitsgedächtnisses durch das Abtragen von Gedächtnisinhalten in äußeren Medien und schließlich die reflektorische Wirkung der äußeren Darstellungen auf das Subjekt sind die wesentlichen Unterstützungsfunktionen, die das Skizzieren im kreativen Prozess ausfüllen kann. Diese sollen im folgenden Abschnitt überblicksartig dargestellt werden.

3.1.1 Opportunistisches Vorgehen, Problemlösen als Handlungsregulation

Für das Lösen konstruktiver Probleme wurden in Abschnitt 2.2.1 (S. 21) bereits methodische Ansätze vorgestellt. Pahl und Beitz (2005) beschreiben allgemeines Problemlösen (engl. *general problem solving*) als ein Vorgehen, in dem zunächst eine Konfrontation mit der Aufgabenstellung stattfindet, die abhängig vom Vorwissen des Handelnden stärker oder schwächer ausfällt. Grundsätzlich ist das Einholen von Informationen zur näheren Bestimmung der Aufgabe und beim Finden möglicher Lösungsprinzipien hilfreich, um diese Konfrontation abzuschwächen und eine klare Definition und Fixierung der wesentlichen Probleme zu ermöglichen. In einer anschließenden schöpferischen Phase werden sowohl methodisch als auch intuitiv Lösungsideen entwickelt und kombiniert. Die entstandenen Lösungsvarianten können aufgrund verschiedener Kriterien beurteilt und daraus eine oder mehrere Lösungen bestimmt werden. Wenn die Ergebnisse der Lösungsphasen dem Handelnden unbefriedigend erscheinen, ist jederzeit ein Zurückschreiten im Prozess möglich und angeraten.

In Abgrenzung zu einem *linearen* Verständnis des Entwurfsproblemlösens schlagen u. a. Hacker (2002), Pache (2005) und Sachse (2002) vor, „konstruktives Entwickeln als komplexe Tätigkeit" (Hacker, 2002, S. 23) zu verstehen. Diese ähnelt einem „opportunistischen Vorgehen mit systematischen Episoden" und ist gekennzeichnet durch „fallbasierte Wissensnutzung", „Teilzielbildung und -verfolgung" und verschiedene Formen „des externen Vorgehens [wie] Sprechen,

Schreiben, Skizzieren, Gestikulieren oder Impromptu-Modell-Herstellens“ (Hacker, 2002, S. 23). In diesem Sinn soll der Begriff Problemlösen im Folgenden verstanden werden.

Skizzierhandlungen und die damit verbundenen Handlungen zur Problemlösung sind trotz ihrer teilweise unsystematischen Abschnitte zielgerichtet. Systematische Vorgehensansätze, beispielsweise formale Vorgehensmodelle (Abschnitt 2.2.1, S. 21), bieten die Möglichkeit, aktuelles Lösungshandeln regelmäßig an Zwischenziele rückzubinden und ein grundsätzlich zielgerichtetes planmäßiges Vorgehen zu ermöglichen. Jedoch spiegelt die diesen Modellen immanente Annahme, dass Aufgaben systematisch zerlegt würden, bis sie mit vorhandenem Vorwissen gelöst werden könnten, nicht reale Problemlöse- oder Konstruktionsprozesse wieder. Dies einerseits nicht, da bei jeder Aufgabendekomposition und Teilproblemlösung unwillkürlich Gedächtnisinhalte aktiviert werden, die den Lösungsprozess unsystematisch mit möglicherweise aufgabenfremden Inhalten in Beziehung setzen, ihn sozusagen „ablenken“ (und auch Anknüpfungspunkte für kreatives Lösungshandeln bieten). Zum anderen setzt die Beschränktheit der Kapazität des Arbeitsgedächtnisses einem rein formal-systematischen Vorgehen Grenzen, da nicht alle Auftragsteile gleichzeitig bewusst und dem Denken zugänglich vorgehalten werden können (vgl. Hacker, 1989). Weiterhin ist, insbesondere bei Konstruktionsaufgaben, die Zielvorstellung anfangs häufig noch undeutlich und selbst Gegenstand des Problems, sie kann also noch nicht systematisch zerlegt werden. Das opportunistische Vorgehen, gepaart mit systematischen Perioden, ermöglicht hingegen insgesamt „eine flexible Anpassung an den individuellen Wissens- und Erfahrungsstand“ (Sachse, 2002, S. 15) und „stellt möglichst geringe Anforderungen sowohl an die intellektuellen Bearbeitungsoperationen als auch an die Gedächtnisaktivierungsprozesse sowie an die beanspruchte Mentalkapazität, also an das Arbeitsgedächtnis“ und folgt so dem Prinzip der kognitiven Ökonomie (ebd.).

Zur Beschreibung des Problemlösens können typische Phasen und Strategien einerseits auf formal deskriptiven Ebenen beschrieben werden, andererseits auf der Ebene der konkreten Handlungen und kognitiven und sensumotorischen Prozesse.

Auf formal abstrakter Ebene wird allgemeines Problemlösen in der Regel mittels der folgenden, rückgekoppelten Phasen beschrieben (vgl. Dylla, 1991; Ehrlenspiel, 1995; Sachse, 2002):

- *Verstehen bzw. Klären des Problems:* Während dieser Phase werden Informationen gesammelt, analysiert und gespeichert, die mentale Repräsentation des Problems wird schrittweise aufgebaut.
- *Suche und Darstellung von Lösungsvarianten bzw. -hypothesen:* Für die in der Klärungsphase vorstrukturierte Problemdefinition werden unter Einbeziehung von Wissen und Informationen Lösungsalternativen entwickelt und fixiert.
- *Auswahl einer Lösungsvariante bzw. -hypothese:* Die gefundenen Lösungen werden daraufhin analysiert, inwieweit sie zur Erreichung des Ziels tauglich sind. Eine Lösung wird ausgewählt.
- *Analyse, Bewertung und Festlegung der Lösung:* Die gefundene Lösung wird anhand der aus der Analyse gewonnenen Informationen bewertet und entweder als bevorzugte Lösung weiter verfolgt oder verworfen.

Ein gängiges Modell der kleinsten Einheiten menschlicher Handlungsregulation ist das Test-Operate-Test-Exit-Konzept (TOTE; Miller et al., 1960; vgl. Vergleichs-Veränderungs-Rückmeldungs-Einheiten [VVR] bei Hacker, 1973), welches bei Problemlöseprozessen zum Tragen kommt, in denen das Ziel bereits bekannt ist (vgl. Abbildung 10). Danach erfolgt der Problemlöseprozess in einer zyklischen Abfolge von Prüf- (Test), Erzeugungs- und Veränderungsschritten (Operate), deren Ergebnisse erneut geprüft werden (Test) und bei Erreichung des Ziels zum erfolgreichen Ende (Exit) oder erneutem Verändern des Lösungsansatzes führt. TOTE-Einheiten können einander inkludierend, hierarchisch oder kaskadierend organisiert sein und komplexe (Teil-) Handlungen aufspannen (vgl. Sachse, 2002).

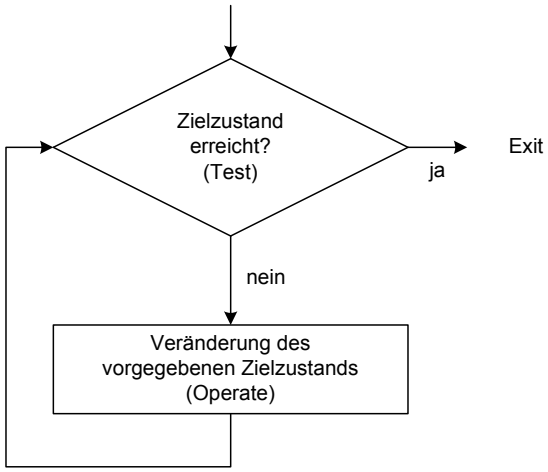


Abbildung 10: Modell der TOTE-Einheiten.

Auch Skizzierhandlungen können als Erzeugungs-, Veränderungs- und Prüfschritte dargestellt werden, die hierarchisch in TOTE-Einheiten organisiert sind (vgl. Pache, 2005):

- Auf der untersten Ebene der Hierarchie liegt die sensumotorische Koordination der Benutzung des Skizziermediums, typischerweise Stift und Papier.
- Die darüber liegenden Ebenen beziehen sich auf die Koordination der dargestellten geometrischen Form.
- Auf den höheren Ebenen wird der Beitrag dieser Form zur Darstellung angemessener konstruktiver Lösungen koordiniert und geprüft.

Auf den höchsten Ebenen kann das Skizzieren selber in den „permanenten Prüf- und Fehlerkorrekturprozess“ des Konstruierens eingeordnet werden (Sachse, 2002, S. 33). Dieser ist, um effizient zu sein, auf kontinuierliche, „unzerschnittene und unverzögert arbeitende Rückkopplungskreise“ angewiesen (Sachse, 2002, S. 33).

Daraus lässt sich ableiten:

- Skizzenbasierte Unterstützungsmethoden sollten flüssiges, rückgekoppeltes Lösungshandeln ermöglichen.

3.1.2 Die Entlastung des Arbeitsgedächtnisses durch Skizzieren

Die am meisten verbreiteten Modelle des menschlichen Gedächtnisses postulieren eine Zwei-Komponenten Theorie. Danach vollziehen sich Informationsspeicherung und -verarbeitung in zwei qualitativ unterschiedlichen Kurzzeit- (KZG) und Langzeitgedächtnissystemen (LZG), welche um einen sensorischen Speicher (auch sensorisches Register, Ultrakurzzeitgedächtnis, ikonisches Gedächtnis) zur Aufnahme äußerer physischer Reize ergänzt werden (vgl. u. a. Atkinson & Shiffrin, 1968; Zimbardo, 1995; Dörner, 1979; Johannsen, 1993).

Abbildung 11 zeigt das Zusammenspiel der Gedächtnissysteme in einem im Wesentlichen auf Atkinson und Shiffrin (1968) zurück gehenden Modell. Hiernach werden im sensorischen Register die auf die Sinnesorgane treffenden äußeren physischen Reize für geringe Zeit (0,5 bis zwei Sekunden) vorgehalten, gefiltert, einer Mustererkennung unterzogen und dem Arbeitsgedächtnis verfügbar gemacht. Zwar ist die Kapazität des sensorischen Registers hoch, jedoch zerfallen die Gedächtnisspuren der Reize schnell oder werden durch neue ersetzt und stehen dem Arbeitsgedächtnis nicht mehr zur Verfügung. Bestimmte sensorische Informationen können direkt ins Langzeitgedächtnis übergehen, ohne vorher bewusst im Arbeitsgedächtnis verarbeitet worden zu sein.

Das Langzeitgedächtnis hat eine virtuell unbegrenzte Kapazität, jedoch ist der Zugriff („sich an etwas erinnern“) auf dessen Inhalte mit 0,5 bis eine Sekunde relativ langsam. Das Speichern von Informationen im Langzeitgedächtnis erfolgt durch Assoziation (Elaboration) mit bestehenden Inhalten und dauert ca. zehnmal länger als das Auslesen (fünf bis zehn Sekunden). Die im Langzeitgedächtnis gespeicherten Informationen lassen sich grob in Kenntnisse über Fakten und Sachverhalte, Vorgehensweisen und Handlungsschemata sowie Organisationskönnen und Handlungsplanung gliedern (vgl. Hacker, 1994).

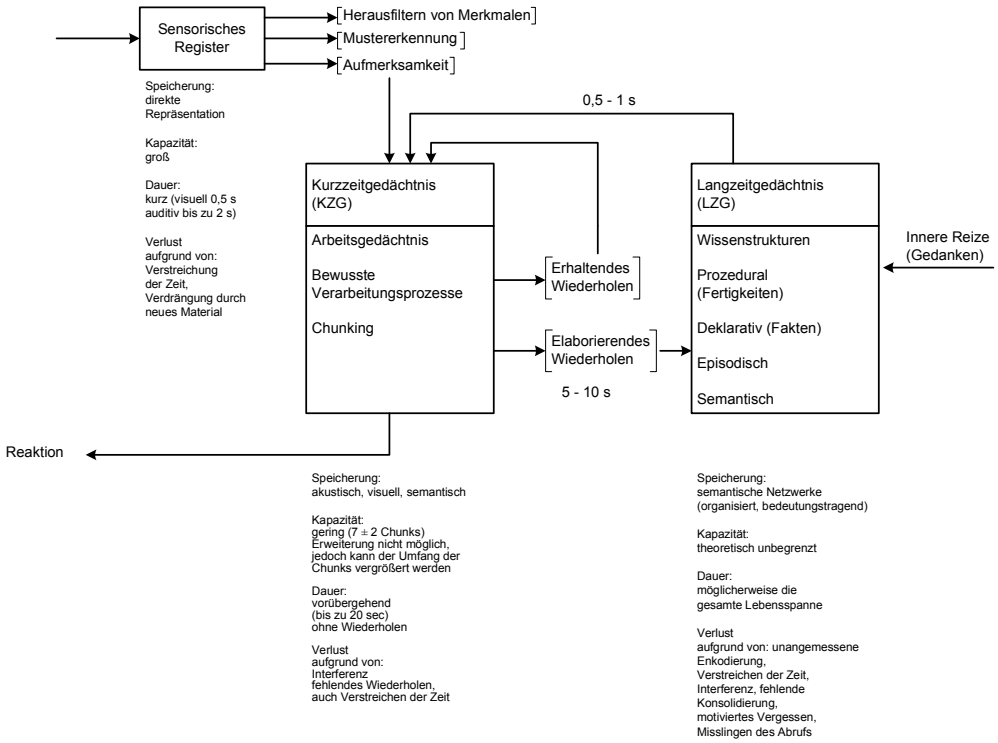


Abbildung 11: Flussmodell eines hypothetischen Gedächtnissystems nach Zimbardo (1995, S. 334) und Atkinson & Shiffrin (1968).

Das Kurzzeitgedächtnis (auch Arbeitsgedächtnis) gilt als der einzige Gedächtnisbereich, dessen Inhalte der bewussten Verarbeitung, d. h. dem „Denken", zugänglich sind. Die Kapazität des Arbeitsgedächtnisses ist begrenzt und wird vereinfachend mit der Millerschen Zahl von sieben plus/minus zwei Informationseinheiten, so genannten „Chunks" angegeben (vgl. Miller, 1956), deren Speicherdauer im Kurzzeitgedächtnis zehn bis 20 Sekunden beträgt. Der spezifische Informationsgehalt (bits) eines Chunks variiert und kann binäre Daten, Zeichen, Symbole, Wörter bis hin zu komplexen Elemente wie Konstellationen von Schachfiguren oder Bauteilen einer Maschine umfassen. Voraussetzung ist, dass die Teilinhalte komplexer Chunks bereits vorverarbeitet im Langzeitgedächtnis vorliegen und als ein Symbol im Arbeitsgedächtnis repräsentiert werden können. Die Zusammenfassung von Gedächtniselementen zu im Arbeitsgedächtnis wirksamen Chunks steigert die Effizienz des Arbeitsgedächtnisses, sie wird als Chunking bezeichnet.

Auch wenn die Millersche Zahl und das Chunking-Modell die realen Gedächtnisprozesse stark vereinfachen, kann die begrenzte Kapazität des Arbeitsgedächtnisses als das „Nadelöhr des Entwurfsdenkens" (Sachse, 2002, S. 18) bezeichnet werden. Die begrenzte Kapazität des Arbeitsgedächtnisses begründet eine der wesentlichsten Funktionen des Skizzierens, nämlich Inhalte, die den aktuellen Entwicklungsgegenstand betreffen, aus dem Arbeitsgedächtnis in externe Medien zu übertragen (zu externalisieren, engl. off-loading). Einerseits wird dadurch das Arbeitsgedächtnis entlastet und kann neue Inhalte aufnehmen (vgl. Tversky, 2003; Ehrlenspiel, 1994). Andererseits stehen die externalisierten Inhalte dem Entwurfsdenken weiterhin über das Auge zur Verfügung (Abschnitt 3.1.3, S. 39).

„Das Gehirn ist kein einfacher Speicher." (Pahl, 1994, S.12) Der Einsatz von Unterstützungsmethoden und -werkzeugen kann Entwicklern und Konstrukteuren daher den Zugang zu gespeichertem Vorwissen erleichtern und seine Rekombination im Rahmen kreativer Entwurfsprozesse fördern. In diesem Zusammenhang werden die Möglichkeiten von Skizzen und des Skizzierens trotz deren nicht formal-präzisen Charakters als Unterstützungsmethode des methodischen Konstruierens und Entwerfens empfohlen. Dies wird insbesondere mit der dem Skizzieren immanenten Einheit des äußeren und inneren Handelns begründet (vgl. Dylla, 1991; Sachse, 2002). Zusammenfassend lässt sich festhalten:

▷ Skizzen sind Werkzeuge zur Entlastung des Arbeitsgedächtnisses.

3.1.3 Abtasten äußerer und innerer Bilder während des Entwerfens

Bis heute ist weitgehend unbekannt, auf welcher Grundlage die Auswahl derjenigen *äußeren* physischen Reize erfolgt, die, nachdem sie im sensorischen Register eingetroffen sind, bewusst weiterverarbeitet werden (vgl. Greenlee, 2002). In der visuellen Modalität ist die Suche nach Reizen ein oft nur teilweise bewusster (präattentiver) Prozess. Sie erfolgt in schnellen Sakkadensprüngen von ca. 50 Millisekunden Dauer, die, abhängig von der angebotenen Reizdichte, direkt auf die Zielreize oder in Positionen zwischen den Zielreizen endet.

In Analogie zum Abtasten äußerer Bilder mittels sakkadenhafter Bewegungen des Auges spricht Lippardt (2000) von dem Abtasten *innerer* Vorstellungsbilder (vgl. Abbildung 12) im Langzeitgedächtnis als einem „inneren Auge" (a. a. O., S. 70; vgl. „seeing with the mind's eye", Kosslyn, 1994a). Äußeres und inneres Auge haben demnach die Funktion, dem Arbeitsgedächtnis Informationen zur Problemlösung zur Verfügung zu stellen. Unter Verweis auf Kosslyns Imagery Theorie schlussfolgert Lippardt, dass räumlich/bildliche Denkoperationen wie Drehen und Abtasten effiziente Funktionen des menschlichen Denkens sind und demzufolge bildliche Modelle, die die Anwendung dieser Funktionen ermöglichen, kreatives Problemlösen unterstützen (Lippardt, 2000, S. 70).

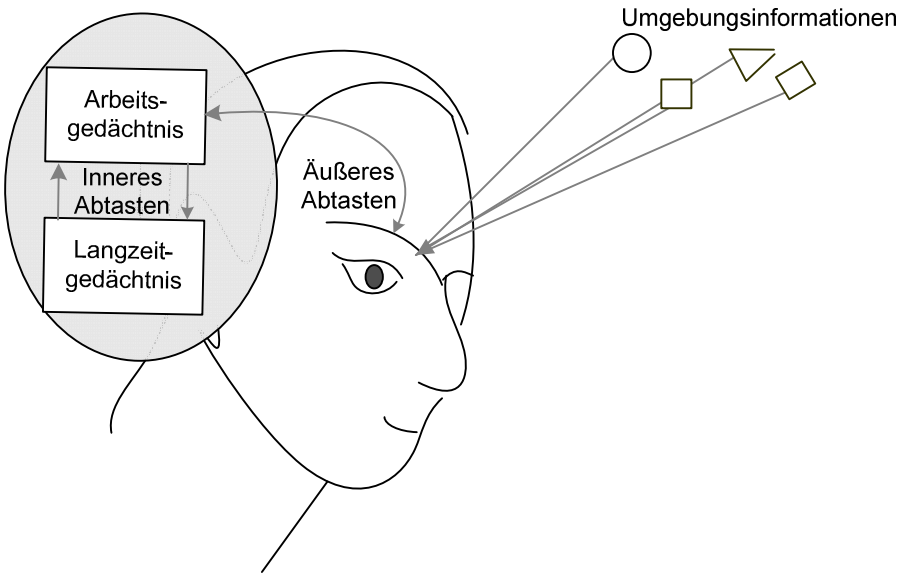


Abbildung 12: Während des Konstruierens beliefern äußeres und inneres Auge das Kurzzeitgedächtnis durch Abtasten äußerer und innerer Bilder mit Informationen.

Über die Verarbeitung mentaler Bilder und Informationen besteht in den Kognitionswissenschaften kein Konsens („The Imagery Debate", vgl. u. a. Kosslyn, 1994a). Einerseits wird ein propositionaler Ansatz vertreten, nach dem die Verarbeitung anhand von Symbolen, losgelöst vom ursprünglichen Informationsträger, erfolgt (vgl. Pylyshyn, 1973). Auf der anderen Seite steht ein bildlich analoger Ansatz visueller Vorstellung (engl. *„mental imagery"),* nach dem das Abtasten innerer Vorstellungsbilder analog zum visuellen Abtasten äußerer physischer Objekten verläuft (vgl. Kosslyn, 1994a; Kosslyn, 1995). Diese Mental Imagery Theorie konnte in vielfältigen Studien empirisch untermauert werden. So ist der Abtastprozess innerer Bilder beispielsweise umso länger, je größer die Distanzen im imaginären Bild sind. In Studien von Kosslyn und Pomerantz (1977) wurde beispielsweise Personen die Aufgabe gestellt, Aussagen zu Objekten auf der Landkarte einer Insel zu treffen, die sie kurz zuvor gesehen hatten. Die Antwortzeit der Teilnehmer war umso länger, je weiter die Objekte auf der ursprünglichen Karte auseinander lagen. Ähnliche Ergebnisse konnten auch für die mentale Rotation imaginierter dreidimensionaler Objekte gefunden werden. In Studien von Shepard und Metzler (1971) wurden Teilnehmer gebeten, sich bestimmte Seiten eines aus Würfeln aufgebauten geometrische Objekte vorzustellen, das sie zuvor als Abbildungen gesehen hatte. Auch hier dauerte die Antwort umso länger, je weiter die ursprüngliche Ansicht und die geforderte Seite auseinander lagen, das heißt, je größer der Rotationswinkel war. Weitere Unterstützung für die Mental Imagery Theorie konnte mittels bildgebender Verfahren gefunden werden. Kosslyn et al. (2001) konnten zeigen, dass die selben Neuronengruppen, sogenannte Spiegelneurone, an der Verarbeitung innerer Vorstellungen und von Außen wahrgenommener Bilder gleicher Art beteiligt sind.

Das Abtasten äußerer und mentaler Bilder vollzieht sich nach der Imagery Theorie von Kosslyn et al. (Kosslyn, 1994b; Kosslyn, 1995) in einem Aufmerksamkeitsfenster (engl. *awareness window*), das auf einem aus Gedächtnisinhalten aufgebauten imaginierten visuellen Bereich (engl. *visual*

buffer) arbeitet. Das Aufmerksamkeitsfenster leitet Informationen zu Objektform, -farbe, -textur und -eigenschaften an ein sogenanntes WHAT-System weiter, das einzelne Objekte sequentiell erkennt und klassifiziert (vgl. Ungerleider & Mishkin, 1982). Die Anordnung von Objekten innerhalb des Visual Buffers sowie deren Bewegungen werden der Theorie folgend in einem so genannten WHERE-System ermittelt (ebd.). Aus der Verarbeitung beider Informationsquellen können Verbindungen zu bekannten Konzepten hergestellt und gegebenenfalls sprachlich verarbeitet werden.

Reeda et al. (2008) konnten zeigen, dass auch in taktiler Objekterkennung eine getrennte Verarbeitung von Objekteigenschaften und -lage erfolgt. Sie gehen daher davon aus, dass WHAT und WHERE-Systeme generelle Prinzipien mentaler Informationsverarbeitung darstellen und nicht auf visuelle Informationen beschränkt sind.

Nach Kosslyn et al. sind die Repräsentationen äußerer und innerer Bilder funktional ähnlich, sie unterscheiden sich jedoch in folgenden Kriterien (Kosslyn, 1994a, S. 74f, 328; Kosslyn, 1994b; vgl. Pache, 2005, S. 14):

- Mentale Bilder sind *flüchtiger* und *verblassen* vergleichsweise schnell, der Aufwand, sie im Bewusstsein zu halten, ist hoch; imaginierte Objekte verblassen zu schnell, als dass sie vollständig inspiziert werden könnten.
- Mentale Bilder werden aus gespeicherten Informationen *generiert*; sie müssen keinerlei Ähnlichkeiten zu aktuellen perzeptuellen Repräsentationen haben.
- Mentale Bilder sind, im Gegensatz zu wahrgenommenen Bildern, sehr *flexibel* und *formbar*.
- In mentalen Bildern können Details leichter *verschwimmen*.

Aus den geschilderten Unterschieden zwischen inneren und äußeren Bildern lassen sich wichtige Unterstützungsfunktionen des Skizzierens ableiten:

Es lässt sich festhalten:

- ▷ Skizzen können inneren Bildern ihre Flüchtigkeit nehmen und diese zu äußeren Bildern in Bezug setzen, d. h. objektivieren.
- ▷ Die Dynamik innerer bildlicher Vorstellungen unterstützt die Transformation wahrgenommener äußerer Bilder und Informationen, sie unterstützt somit effektives Handeln.

Skizzieren kann als eine Methode verstanden werden, imaginierten mentalen Bildern durch die Übertragung in ein externes Medium ihre Flüchtigkeit zu nehmen. Sie erhalten so die Qualität äußerer, *objektivierbarer* Bilder (Abschnitt 3.1.4, S. 42). Andererseits ermöglicht die Flexibilität bildlicher Vorstellungen (Imagery), äußere Bildern innerlich zu transformieren und ihnen Dynamik zu verleihen (vgl. Kosslyn, 1980). „Die Wechsel zwischen Verinnerlichungen und Entäußerungen haben für das Entwurfshandeln eine wesentliche Rolle“ (Hacker, 1994, S. 3). Dieses Zusammenspiel wird durch die Methodik des Skizzierens in besonderer Weise unterstützt und wird

im Folgenden als „Prozess des Wechsels zwischen ‚innerem' und ‚äußerem' Handeln" (vgl. Sachse, 2002, S. 32ff) beschrieben.

3.1.4 Äußeres und inneres Handeln, Externalisieren und Internalisieren während des Skizzierens

„Ich glaube, dass mancher große Redner, in dem Augenblick, da er den Mund aufmachte, noch nicht wusste, was er sagen würde. Aber die Überzeugung, dass er die ihm nötige Gedankenfülle schon aus den Umständen, und der daraus resultierenden Erregung seines Gemüts schöpfen würde, machte ihn dreist genug, den Anfang, auf gutes Glück hin, zu setzen." (von Kleist, 2002, S. 26) Diese Überlegungen Heinrich von Kleists zur Entstehung der Ideen während des Sprechens haben vielen Arbeiten zur Verfertigung der Gedanken beim Skizzieren Anstoß gegeben. Unter Verweis auf Kleist und Galperins Interiorisations-/Exteriorisationskonzept (Galperin, 1966; Galperin & Talysina, 1966) unterstreichen beispielsweise Hacker (1994, S. 3; 2002, S. 17) und Sachse (2002, S. 33) die „unabänderbare, notwendige Einheit [von) ‚inneren' und ‚äußeren' Prozessen", die menschliches Handeln und auch das Konstruieren im Speziellen kennzeichnet.

Galperin (1966) spricht in seiner pädagogisch inspirierten Theorie der „geistigen Handlung" von Orientierungs-, Handlungs- und Kontrollphasen, in denen das äußere Materialisieren innerer Modelle insbesondere die Funktion hat, diese geistigen Handlungen zugänglich zu machen. „Mit Hilfe des Materialisierens (gedachter Eigenschaften und Beziehungen) nehmen die objektiven Eigenschaften und Beziehungen, die uns in ihrer wirklichen materiellen Form nicht unmittelbar zugänglich sind, dennoch eine materialisierte Form an und können von uns wahrgenommen werden. Diese Möglichkeit ist für den Aneignungsprozess außerordentlich wichtig." (a. a. O., S. 37). Materialisierte Modelle können später sprachlich erfasst und in äußerlichen (gesprochenen) Begriffen verkürzt werden. „Die Handlung mit Hilfe der äußeren Sprache bildet sich als Widerspiegelung der materiellen oder materialisierten Handlung" (a. a. O., S. 39). Mittels der Sprache vollzieht sich eine Loslösung von der eigentlichen Handlung, diese wird verallgemeinert, verinnerlicht und kann Teil des inneren Denkens werden. Zur materiellen Auseinandersetzung ist nicht das Objekt nötig, sondern reicht eine reduzierte Form aus. Diese muss nur diejenigen Eigenschaften aufweisen, die „für den Handlungsverlauf wesentlich sind" (a. a. O., S. 37). Solche Formen können beispielsweise gegenständliche Modelle und Skizzen sein.

Neben den von Galperin herausgestellten Funktionen des Materialisierens und Objektivierens innerer Modelle (siehe unten, vgl. auch „Begreifen" bei Piaget, 1969) hob Görner (1973) in Bezug auf den Wechsel innerer und äußerer Denkprozesse insbesondere dessen Funktion für die Ideenerzeugung hervor. Nach Untersuchungen des Verhaltens von Experten und Studenten in frühen Produktentwurfsphasen schlussfolgert Görner: „Aufgrund unserer Ergebnisse können wir die seit langem tradierte Meinung, die Zeichnung sei die Objektivation der vorher vom Konstrukteur gedanklich-anschaulich entwickelten Vorstellung eines technischen Gebildes, die mit dem Konstruieren selbst nichts zu tun habe, nicht mehr aufrecht erhalten." (Görner, 1973, S. 13; zit. n. Hacker, 1995, S.7). Eine ähnlichen Analyse nahm Schön (1983) vor, der anhand einer Diskussion zweier Architekten darstellte, wie eine motorische und sprachliche Auseinandersetzung mit ursprünglichen Lösungen unwillkürliche „nicht-intendierte Veränderungen" erzeugt und so letztlich ökonomisches Konstruieren ermöglicht (engl. „*economy of design*", Schön, 1983, S. 102; vgl. op-

portunistisches Vorgehen im Abschnitt 3.1.1, S. 34). „In einem guten Design Prozess ist [die] Konversation mit der Situation reflektiv. Als Antwort auf die Rückantwort der Situation (engl. *back-talk*) reflektiert der Designer seine Handlungen (engl. *reflects-in-action*) in Bezug auf die Konstruktion des Problems, seine Handlungsstrategien, oder das erstellte Modell (...)“ (a. a. O., S. 79). In diesem Prozess ist es entscheidend, „dass die Externalisierung nicht einfach einer Fixierung intern verfertigter Lösungen / Ideen entspricht, sondern diese im mentalmotorischen Prozess zumindest ausgeformt wenn nicht sogar erzeugt und entwickelt werden.“ (Sachse, 2002, S. 33).

Die in Externalisierungsprozessen erstellten äußeren Modelle (Skizzen, physische Objekte etc.), wie auch die Wahrnehmung der eigenen *äußeren* informationsverarbeitenden Prozesse erlauben es dem Handelnden, zeitweilig über das eigene Bearbeitungsvorgehen nachzudenken und die (Teil-)Ergebnisse zu bewerten. Hacker (1999; 2002) schreibt diesen von ihm als *Objektivierungsabschnitte* bezeichneten Phasen besonders leistungsfördernde Funktionen zu, da sie Beziehungsnetze zur Sachlogik des Gegenstandes oder bestehender Symbolsysteme aufrufen. Die im Äußeren fixierten Lösungsteile bieten sich demnach einer Inspektion durch den Handelnden geradezu an. Außerdem können in ihnen Hindernisse und Alternativen eindeutiger erkannt werden, als beim reinen „Problemlösen im Kopf“ (Hacker, 2002, S. 25). Die „ständige visuelle Vergleichsmöglichkeit des erzielten Bildes mit der gedanklichen Vorstellung“ wird auch von Brauer (1968; zit. n. Sachse, 2002, S. 40) hervorgehoben. Bild und Gedanke unterstützen sich gegenseitig in ähnlicher Weise wie Sprache und Gedanke in Kleists oben angeführtem Zitat.

- ▷ Mittels Skizzierens ist es möglich, innere Bilder schnell zu objektivieren.
- ▷ Die Unterstützung der Ideenfindung ist eine der Hauptfunktionen des Skizzierens.

3.1.5 Skizzieren als Selbstkommunikationsprozess

Oft wird Skizzieren als Selbstkommunikationsprozess des Handelnden mit sich selbst, vermittelt durch die Skizze, beschrieben. Ehrlenspiel (1994) nennt Skizzen beispielsweise „Diskussionspartner“, die Personen „zur Eigenschaftsanalyse und als Ausgangsbasis zum Anpassen an die konkrete Situation“ verwenden (a. a. O., S. 48f). Schön (1983) spricht vom „back-talk“ (a. a. O., S. 79) der Designsituation. Sachse (2002) verweist auf den Skizzierprozess als „Selbstgespräch“ (S. 41).

In Anlehnung an Pache (2005) wird in dieser Arbeit ein Modell der Selbstkommunikation verwendet, um Wirkungs- und Störpotenzial von technischen Unterstützungsmethoden des Skizzierens zu beschreiben (siehe auch Störgrößen in Mensch-Maschine-Systemen in Abschnitt 4.4, S. 84).

Zur Analyse des Selbst-Kommunikationsprozesses wendet Pache (2005) das lineare Kommunikationsmodell von Shannon und Weaver (1949) an. Dieses beschreibt den Informationsaustausch von einer Quelle über einen Sender (engl. *transmitter*) zu einem Empfänger (engl. *receiver*) und

Adressat (engl. *destination*). Pache modelliert den Selbstkommunikationsprozess, indem er im Shannon/Weaver-Modell Sender und Empfänger gleich setzt (vgl. Abbildung 13).

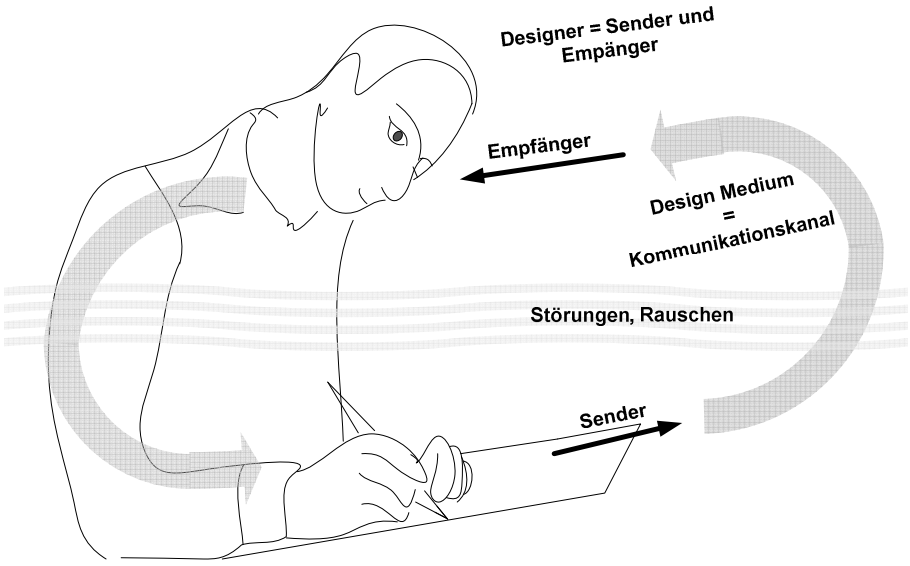


Abbildung 13: Selbstkommunikation während des Skizzierens in Anlehnung an Pache (2005).

Die im Shannon/Weaver-Modell und in erweiterten Modellen (vgl. u. a. Krippendorf, 1986; Abbildung 14) durch Störquellen (engl. *noise sources*) verursachten *Störungen* sind kennzeichnend für jeden Kommunikationsprozess, ob technisch vermittelt oder nicht. Sie verursachen Veränderungen der Mitteilung durch Hinzufügen irrelevanter, oft störender Information (Rauschen) und durch den Verlust relevanter Informationen (Äquivokation). Die tatsächlich vom Sender zum Empfänger übertragene Information wird als *Transinformation* bezeichnet (vgl. Schulz, 2000).

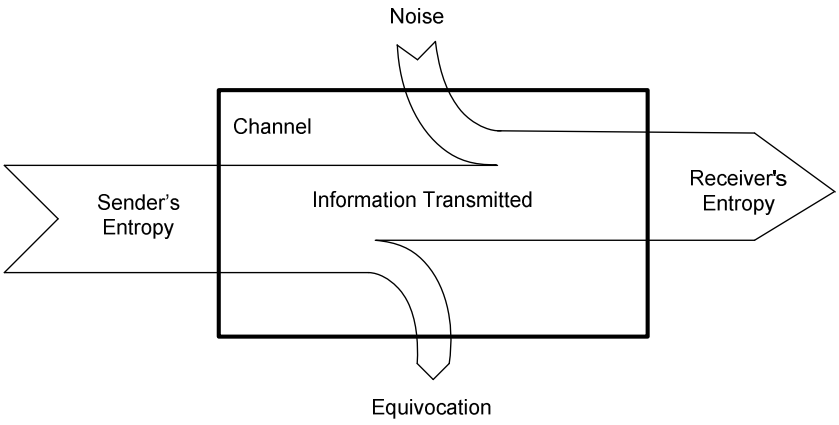


Abbildung 14: Rauschen im Informationsübertragungsprozess nach Krippendorf (1986).

Störungen der Selbstkommunikationsprozesse sind insbesondere in technisch unterstützten Interaktionsprozessen relevant[1]. Einerseits können die durch Medium, Werkzeug, persönliche Fertigkeiten und Wahrnehmungsverzerrungen verursachten Abweichungen des externen Bildes vom inneren Bild des Handelnden als Störungen der Externalisierungsprozesse aufgefasst werden. Andererseits kann eine durch das Medium hervorgerufene Veränderung auch inspirierend auf den Handelnden wirken und die „Bausteine" für kreative Prozesse liefern, beispielsweise durch die variierende Stärke des Bleistiftstrichs, die Eigenschaften des Papiers oder die Rasterung digitaler Anzeigen.

Es lässt sich schlussfolgern:

- Störungen des Selbstkommunikationsprozesses können den Handelnden einerseits inspirieren, andererseits aber auch behindern.

Jüngere Kommunikationsmodelle heben die am Shannon/Weaver-Modell (1949) häufig kritisierte Linearität und fehlende Rückmeldung vom Empfänger auf. Sie scheinen geeigneter, den Selbstkommunikationsprozess zu modellieren. Im symmetrischen Interaktionsmodell von Schramm (1971) kommunizieren beide Partner abwechselnd, oft in rascher Folge und in Überschneidung miteinander, so dass es zu einer Aufhebung der Rolle von Sender und Empfänger kommt. Integriert man den durch Pache (2005) vorgenommenen „Kurzschluss" Sender=Empfänger in Schramms Modell, erhält die Skizze einen aktiven Charakter als „Kommunikationspartner", in der Externalisierungs- und Reflektionsprozess einzeln modelliert sind. Die Skizze wird zwar nicht zum Subjekt, das Modell trägt aber der Tatsache Rechnung, dass nicht nur intendiertes und erzeugtes, sondern auch erzeugtes und wahrgenommenes Bild voneinander abweichen (vgl. Abbildung 15).

Das Modell von Shannon und Weaver unterstellt ein Informationsgefälle zwischen Sender und Empfänger als Voraussetzung für das Zustandekommen der Kommunikation. Im Fall der Selbstkommunikation beim Skizzieren besteht dieses Gefälle darin, dass am äußeren Modell wichtige Handlungen und Problemlöseschritte vollzogen werden können, die im inneren Modell nicht möglich sind. Das Informationsgefälle bildet damit auch die Grundlage der oben beschriebenen besonders leistungsfördernden Objektivierungsabschnitte (vgl. Hacker 1999, 2002, Abbildung 15 und Abschnitt 3.1.4, S. 42).

[1] Störungen der (Selbst-)Kommunikation in virtuellen Umgebungen werden in Abschnitt 4.4, S. 84 vertieft.

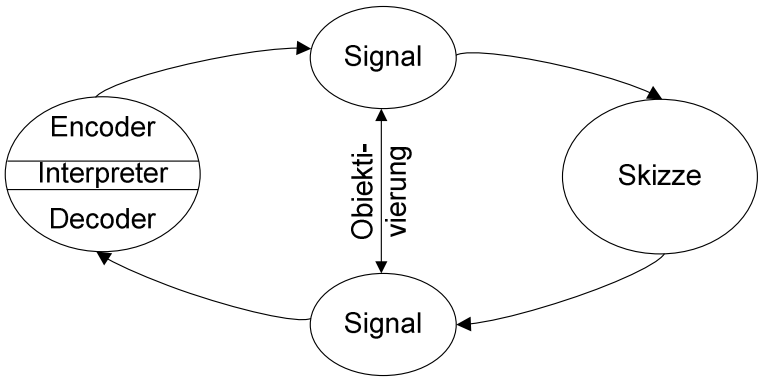


Abbildung 15: Modell der Selbstkommunikation während des Skizzierens (vgl. Schramm, 1971).

3.1.6 Geste, Skizze, Modell, Prototyp

Es wurde bereits darauf eingegangen, dass äußere geistige Tätigkeiten Medien und gegebenenfalls formbare Materialien benötigen (vgl. Hacker, 1994). Die Externalisierung und Objektivierung innerer (bildlicher) Modelle kann sich demnach auch in anderen Formen als gezeichneten Skizzen vollziehen. Im Gegenteil stellen Skizzen sogar eine relativ fixierte Form äußerer Bilder dar, vergleicht man sie mit Gesten und Körperbewegungen, die von Konstrukteuren häufig als Vorwegnahme von Skizzen vollführt werden.

Im Übergangsprozess von geistigen Handlungen in gegenständlich-praktische Handlungen vollziehen sich während des Darstellungsprozesses sensumotorische Vorgänge, die zu unterschiedlich stark fixierten äußeren Bildern und Modellen führen (Sachse, 2002, S. 53, 67). Die Geste kann als „die offenste, damit zugleich auch unverbindlichste, nicht fixierte Ausdrucks- und Darstellungsform charakterisiert werden“ (Sachse, 2002, S. 53). Gesten erzeugen „vergängliche und flüchtige Wahrnehmungsbilder“ (Hornecker, 2007b, S. 90) und gelten als die Vorform des Strichs oder der tastenden und modellierenden Bewegung. Sie erlauben es, die Ergebnisse einer Manipulation schon vorherzusehen, bevor sie tatsächlich durchgeführt werden (vgl. Fish & Scrivener, 1990). „Gesten erfolgen konstruktionsbegleitend und ergänzen oder alternieren u. a. die Darstellungshandlungen des Skizzierens und Modellierens (...) Der Konstrukteur stellt sich das ‚Verhalten der Dinge’ nicht nur vor, sondern versucht es gestisch zu erleben, mitzuteilen und bei Bedarf materialisierend festzuhalten (...) Es ist häufig zu beobachten, dass Konstrukteure, bevor sie z. B. den ersten Skizzenstrich auf das Papier setzen, mit dem Stift scheinbar ruhelos schwingend, kreisend ‚sammelnd’ den Anfang suchen.“ (Sachse, 2002, S. 54) In Untersuchungen des kollaborativen Entwickelns konnte Tang (1991) die Bedeutung von Gesten empirisch belegen: 35 Prozent aller von Designern im Entwurfsprozess ausgeführten Aktionen waren Gesten, diese enthielten auch Informationen, die später nicht in fixierte Entwürfe oder Skizzen einflossen.

Wurde das innere Modell durch die gestische Bewegung genügend objektiviert, können fixierende Bewegung in der Skizze oder am physischen Modell ausgeführt werden. Gestische und fixierende Bewegung ähneln dabei einander, die Geste scheint die fixierende Bewegung vorweg zu nehmen.

Dreidimensionale Skizziersysteme, die einen einfachen Übergang von gestischer auf fixierende Bewegung ermöglichen, versprechen daher, den Externalisierungsprozess zu unterstützen (Kapitel 5).

Es lässt sich schlussfolgern:

- Dreidimensionale Skizziersysteme versprechen einen erleichterten Übergang von nicht-fixierender innerer/gestischer Denkhandlung zu fixierten Handlungen an äußeren Modellen.

Die Fixierung der Gestaltungsvarianten und die Präzision der Lösungsprinzipien schreiten in CAD-Modellen und Prototypen immer weiter fort und führen schließlich zum Produkt als vorläufigem Entwicklungsendpunkt (vgl. Abbildung 16).

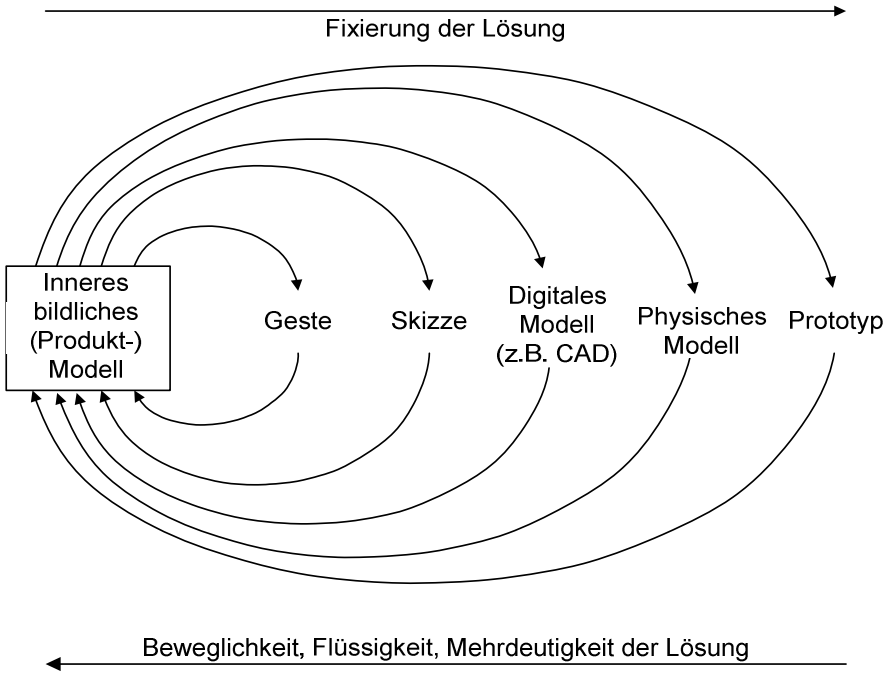


Abbildung 16: Fixierungsgrade äußeren Handelns während des Skizzierens.

3.2 Faktoren kreativen Denkens und Handelns

Wurde das Skizzieren in den vorangegangen Abschnitten als *Tätigkeit* beschrieben, soll in den kommenden Abschnitten dargelegt werden, wie diese Tätigkeit in die Arbeitsumgebung des Handelnden eingebettet ist. Dazu werden anhand des Konzepts *Kreativität* die Einflüsse der Persön-

lichkeit, der Umwelt und der Problemstellung auf den kreativen Prozess sowie dessen Produkte diskutiert.

Mit Hilfe dieser Darstellungen sollen die größtenteils sehr pragmatischen Erkenntnisse der Kreativitätsforschung für die Gestaltung skizzenbasierter Unterstützungssysteme nutzbar gemacht werden. Weiterhin bieten die Bewertungsmethoden für kreative Produkte Möglichkeiten, solche Unterstützungssysteme zu evaluieren (Kapitel 7 und 9).

Aufgrund des großen Umfangs der Kreativitätsforschung kann hier nur ein Bruchteil der relevanten Arbeiten berücksichtigt werden. Als Leitfaden dient das „4 P-U Modell" von Urban (1993; 2004).

3.2.1 Definitionen des Begriffs Kreativität

Kreativität ist einer der „verwirrendsten und mehrdeutigsten Begriffe der Psychologie und Pädagogik" (Urban & Jellen, 1995, S. 8). Im wissenschaftlichen und alltäglichen Gebrauch des Begriffs Kreativität herrscht ein „Begriffswirrwarr" (ebd.) aus vielen Bedeutungsnuancen (vgl. auch Simon, 1989; Anderson, 1996). Nichts desto weniger ist Kreativität ein wichtiges Betätigungsfeld interdisziplinärer Forschung. Die Persönlichkeitsforschung bezeichnet Kreativität als Fähigkeit, Artefakte oder nichtdingliche Objekte zu schaffen, die sowohl *neu* als auch *nützlich* und *brauchbar* sind (vgl. Dörner, 1999; Amelang & Bartussek, 1997). „Neu" wird häufig synonym zu „originell", „überraschend" und „unüblich" gebraucht. Alternativ zu „brauchbar" und „nützlich" werden demgegenüber oft Attribute wie „Aufgaben angemessen", „anpassungsfähig" oder „wertvoll" verwendet (vgl. Sternberg & Lubart, 1999; Boden, 2004; Zimbardo, 1995). Kronfeldner (2005) sieht die psychologische Spontaneität, das „Erfinderische", als einen Kernaspekt des kreativen Prozesses an und zeigt damit einen Gegensatz zwischen Routine und Kreativität auf. Demnach schließt Kreativität reines Kopieren aus und entzieht sich in wichtigen Phasen, insbesondere in den sogenannten Inkubations- und Inspirationsphasen, der bewussten Kontrolle.

Obwohl Kreativität primär als eine durch Persönlichkeitsmerkmale und kognitive Faktoren bestimmte persönliche Eigenschaft gilt, wird schöpferische Betätigung auch durch die situativen Bedingungen beeinflusst, unter denen sie sich vollzieht (vgl. Amelang & Bartussek, 1997). Diese Faktoren werden im „4 P-U Modell" von Urban zusammengefasst. Es stellt Kreativität im Zusammenspiel der Entstehung eines kreativen *Produkts,* des zu lösenden *Problems*, der individuellen *Personenmerkmale*, des kreativen *Prozesses* und den direkt und indirekt einwirkenden *Umweltbedingungen* dar (vgl. Abbildung 17). In diesem Modell können alle Komponenten auf Mikro-, Meso- und Makroebene sowohl anregend als auch hemmend auf den kreativen Prozess wirken bzw. von ihm beeinflusst werden (vgl. Urban, 2004; Urban, 1993; Preiser, 2006). Im Sinne dieses und anderer Modelle menschlicher Kreativität kann von kreativen, bzw. Kreativität förderlichen Umwelten (Amelang & Bartussek, 1997, S. 263) und kreativen Produkten gesprochen werden, auf die in den folgenden Abschnitten eingegangen wird.

3.2.2 Der kreative Prozess

Obwohl kreative Einfälle häufig scheinbar plötzlich und „aus dem Nichts" entstehen, sind sie eingebettet in einen mehrstufigen, zeitlich sehr variablen Prozess. Dieser wird in stark vereinfachender Weise in vier Phasen beschrieben (vgl. u. a. Intons-Peterson, 1993; Gabora, 2002):

- *Vorbereitung (engl. preparation):* In dieser Phase werden Informationen und Vorwissen erworben und vernetzt, können jedoch noch nicht zu erfolgreichen Lösungen des Problems synthetisiert werden. Nach Amabile (1983) wirken sich die Dichte und Organisation des Vorwissens auf die Anzahl der später generierbaren Lösungsalternativen aus.
- *Inkubation (engl. incubation):* Die erworbenen Informationen werden kaum oder gar nicht bewusst verarbeitet, es kommt jedoch zu unwillkürlichen Aktivierungen und Hervorhebungen lösungsrelevanter Verbindungen, die beispielsweise durch Umweltreize aktiviert werden; ungeeignete Varianten verblassen dagegen allmählich (vgl. Dörner, 1979). Der Erfolg der Inkubation ist abhängig von deren Dauer, den Aktivitäten während der Inkubation, dem Auftreten von Hinweisreizen vor, während und nach der Inkubation und der Dauer der Vorbereitungsphase (Dodds et al., 2004). Die Inkubationsphase kann dennoch gesteuert und unterstützt werden, indem beispielsweise Kreativitätstechniken eingesetzt werden (vgl. Intons-Peterson, 1993).
- *Eingebung (engl. illumination):* Eine oder mehrere Lösungsideen werden dem Bewusstsein unvorhergesehen als zunächst noch vage und wenig ausgearbeitete Alternativen zugänglich.
- *Überprüfung (engl. verification):* Die Lösung wird in eine überprüfbare Form gebracht, getestet und gegebenenfalls gemeinsam diskutiert. Im Herstellen einer „interpersonellen Übereinstimmung" bezüglich der kreativen Produkte bzw. „Modelle" sieht Petruschat (2005) die eigentliche Herausforderung an den kreativen Prozess. Die Kreativität als „Erzeugen von Vorstellungsbildern" (a. a. O., S. 109) ist ihm zufolge dagegen eine Normalität menschlichen Erlebens.

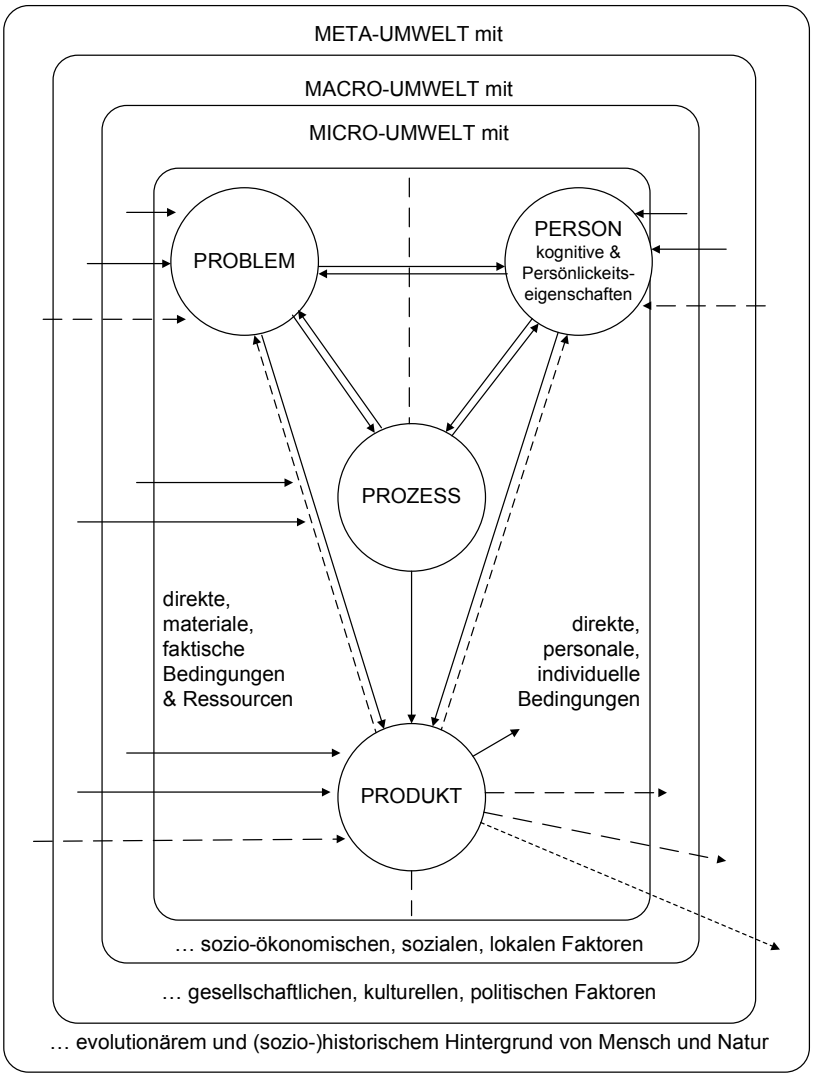


Abbildung 17: „4 P-U Modell": Problem-Person-Prozess-Produkt-Umwelt-Faktoren des kreativen Denkens und Handelns (nach Urban, 2004, S. 33).

Kreative Prozesse sind daran zu erkennen, dass charakteristische menschliche Fähigkeiten besonders stark zum Tragen kommen. Zu diesen Fähigkeiten werden am häufigsten gezählt (vgl. Urban, 2004, S. 34; Amelang & Bartussek, 1997; Dörner, 1999; Zimbardo, 1995, S. 536; Guilford, 1959):

- *Problemsensitivität*: Die Fähigkeit zu erkennen, wo das Problem liegt
- *Zielgerichtete aber hochflexible Verarbeitung:* Regelmäßige Rückbindung an das Ziel, ohne die notwendige hohe Flexibilität des Prozesses einzuschränken
- *Flüssigkeit*: Rasche Produktion unterschiedlicher Ideen, Symbole und Bilder
- *Flexibilität und Umstrukturierung*: Verlassen gewohnter Denkschemata, Wechsel der Bezugssysteme, Variable Verwendung von Informationen
- *Redefinition*: Um- und Neuinterpretation bekannter Objekte, Improvisation

- *Elaboration*: Ausgestalten allgemeiner unscharfer Plan-Konturen
- *Originalität*: Seltenheit, vom Konventionellen abweichende Gedankenführung bzw. Denkresultate
- *Wahrnehmung und Analyse:* gesteigerte Sensibilität gegenüber nicht einfach zu bemerkenden Gegebenheiten
- *Synthese*: gesteigerte Fähigkeit, Verbindungen zu knüpfen und Vorstellungen und Erfahrungen auf neue und bedeutende Art zusammenzubringen
- *Strukturierung und Komposition*: Fähigkeit, die im Prozess entstehenden Lösungselemente trotz deren Neuartigkeit und Ungewöhnlichkeit in eine Lösungsgestalt umzusetzen
- *Bildhaftigkeit*: Erstellen und Nutzen nonverbaler Bilder oder besonderer *interner Repräsentationen* räumlicher oder visueller Art

Oft wird Kreativität mit *divergentem Denken* gleichgestellt, welches darauf gerichtet ist, mehrere voneinander verschiedene Lösungen zu produzieren, im Gegensatz zu *konvergentem Denken*, welches in der Regel eine einzige richtige Lösung auf der Basis von Tatsachen und logischen Regeln hervorbringt (Amelang & Bartussek, 1997, S. 264). Da aber sowohl klar formulierte Probleme als auch zunächst unbestimmte Aufgaben kreativ gelöst und validiert werden können, wozu im ersteren Fall vorrangig konvergentes, in zweitem Fall divergentes Denken nötig ist, würde eine Beschränkung auf letzteres das Kreativitätskonzept unnötig „einschnüren" und zu „Kurzschlüssigkeiten" führen (Urban & Jellen, 1995, S. 8).

Nach Urban (2004) schafft Kreativität neue, ungewöhnliche und überraschende Produkte durch Analyse, lösungsgerichteter Verarbeitung, ungewöhnlicher Assoziation, Umstrukturierung, Reformulierung oder Kombination vorhandener Informationen und praktischer Erfahrungen. Mittels Synthetisierung, Strukturierung und Komposition werden „Lösungsgestalten" in einem Produkt realisiert und elaboriert, welches von anderen sinnhaft erfasst und als sinnvoll erfahren werden kann (Urban, 2004, S. 34; vgl. auch Amelang & Bartussek, 1997; Dörner, 1999).

3.2.3 Motivation und Kreativität

Die Persönlichkeitsmerkmale Kreativität und Intelligenz werden oft derart miteinander verglichen, dass hohe Intelligenz nicht zwangsweise eine hohe Kreativität bedingt, jedoch hohe Kreativität überdurchschnittlich hohe Intelligenz voraussetzt (vgl. Amelang & Bartussek, 1997). In Hinblick auf die Aneignung des Wissens und der Fertigkeiten, die für kreative Prozesse notwendig sind, hebt unter anderem Urban (2004) die Bedeutung motivationaler Aspekte hervor. Die Motivation und nicht persönliche Anlagen erklärt demnach einen großen Teil der individuellen kognitiven Unterschiede zwischen „kreativen" und „nicht-kreativen" Individuen (Urban, 2004, S. 50). Dabei ist zwischen intrinsischer Motivation (beispielsweise spielerisches Handeln; Amabile, 1983, S. 86) und extrinsischer Motivation (beispielsweise bezahlte Arbeit, ebd.) zu unterscheiden. Zwar gibt es starke empirische Befunde dafür, dass extrinsische Motivation durch das Setzen externer Stimuli (beispielsweise Bezahlung) oder Sanktionen (beispielsweise Fristen, Deadlines) im Vergleich zu intrinsisch Motivation einen negativen Einfluss auf die individuelle kreative Leistung hat (Hennessey & Amabile, 1988, S. 18), dieser Effekt kann jedoch durch die bewusste

Herausarbeitung und Verdeutlichung möglicher intrinsischer Motivationsgründe ausgeglichen werden (a. a. O., S. 27).

▷ Intrinsische Motivation erhöht die kreative Leistung.

3.2.4 Kreativitätsfördernde Umweltbedingungen

Im Kontext kreativen Problemlösens werden häufig die soziale Makro-Umwelt (sozio-historisch, kulturell, ökonomisch, politisch) und die Mikro-Umwelt (sozio-ökonomische Bedingungen, regionale und lokale Voraussetzungen) des kreativen Individuums betrachtet (Urban 2004, S. 32). Bei der Entwicklung kreativer und innovativer Produkte stammen die relevanten Umweltinformationen auf Makro-, Meso- und Mikroebene z. B. aus den avisierten Produktmärkten mitsamt konkurrierenden Produkten, dem avisierten Einsatzumfeld des Produkts und dem Unternehmen selbst. Auch die bereits im Unternehmen entwickelten Produkte und fertigungstechnische Informationen fließen als Umweltinformationen in die Entwicklung neuer kreativer Produkte ein.

Nach Sternberg und Lubart (1991; zit. n. Amelang & Bartussek, 1997, S. 285) hat die Umgebung in dreifacher Weise Einfluss auf den kreativen Prozess. Erstens stellen die Stimuli (Cues) der Umwelt häufig die „Bausteine" für kreative Produkte zur Verfügung. Zweitens kann das „allgemeine Klima" kreative Gedanken entscheidend fördern oder behindern. Und schließlich spielt der Kontext eine erhebliche Rolle für die Bewertung der Ideen und Produkte. Der Einfluss der Umwelt auf den kreativen Prozess konnte in mehreren Studien nachgewiesen werden. So wurde wiederholt gezeigt, dass Personen in mit Gegenständen gefüllten Räumen erheblich flüssiger denken (vgl. Ward, 1969) bzw. bessere Ergebnisse in Kreativtests erreichten (vgl. Friedmann et al., 1978) als in leeren Räumen. Dies zeigte sich häufig aber erst, nachdem sie aufgefordert wurden, die externen Objekte in den Denkprozess einzubeziehen. La Greca (1980) beschreibt in einer weiteren Studie, dass Personen zur Beantwortung von Fragen eines Kreativitätstest die Umwelt visuell abtasten (engl. *environmental scanning*) und Fragen nach ungewöhnlichen Objekten in Räumen mit vielen Objekten besser beantworten können.

▷ Die Umwelt kann „Bausteine" für kreative Denkprozesse zur Verfügung stellen.

Die Bedeutung der Umweltressourcen für den kreativen Prozess wird auch von Amabile (1983) unterstrichen. In ihrem „Componential Framework" der Kreativität liefern äußere Umwelt- und innere Gedächtnisinhalte wichtige Informationen für das Auffinden und Ausführen von problemangemessenen Handlungen. Sie hebt weiterhin die Bedeutung eines stimulierenden physikalischen Milieus und spielerischer Handlungsräume hervor, die sie als kennzeichnend für intrinsisch motivierte kreative Prozesse betrachtet (S. 86).

Shepard (1978; zit. n. Intons-Peterson, 1993) vermutet, dass das Zusammenwirken äußerer visueller Umwelteindrücke und innerer bildlicher Vorstellungskraft (engl. *imagery*, Abschnitt 3.1.3, S. 39f) dem kreativen Prozess seine spezielle Effizienz verleiht. Demnach entspringen die neuesten und radikalsten Ideen in erster Linie dem bildlichen Vorstellungsvermögen, das - im Gegensatz zum verbalen System - sehr flexibel und wenig einengend ist. Nach Shepard lassen sich Verbindungen und Interaktionen zwischen äußeren und inneren Objekten visuell leichter und umfassender herstellen als sprachlich. Ebenso sollen Bilder innerlich weitaus einfacher zu simulieren (das heißt zu prädizieren) sein als verbale Sprache, sie seien daher dem flüssigen und intuitiven Handeln leichter zugänglich. Auch die emotionale und motivationale Wirkung von Bildern ist nach Shepard wesentlich größer als die Wirkung verbaler Sprache. Letztlich nimmt Shepard an, dass das visuelle System aufgrund seiner hohen Sensitivität eine wesentliche Hilfe beim Auffinden von strukturellen Symmetrien zwischen verschiedenen Domänen bieten kann. Solche Symmetrien bilden häufig den Ausgangpunkt kreativer Problemlösungen. Verschiedene Kreativitätstechniken der Produktentwicklung wie beispielsweise die visuelle Synektik sehen daher vor, scheinbar lösungsfremde Informationen oder Information aus einem weiten Produktkontext sichtbar zu machen, z. B. in Form von Materialsammlungen, Collagen oder auch durch szenische Darstellungen in der Umgebung der Entwickler (vgl. u. a. Pahl et al., 2005; Heers, 2006; Buxton, 2007; Snyder, 2003). Durch die Auseinandersetzung mit diesen fremden Informationen kann sich der Entwickler von vorgefertigten, möglicherweise zu konventionellen Lösungsideen entfernen, und ursprünglich nicht zugängliche, neuartige Lösungsmöglichkeiten finden. Immer häufiger werden hierzu auch hybride physisch/digitale Systeme eingesetzt, die physische, greifbare Objekte und digitale Projektionen miteinander verbinden. So stellen Stappers et al. (2007) interaktive Systeme für konzeptionelle Tätigkeiten vor, die beispielsweise Oberflächentexturen auf weiße Produkthüllen projizieren, hybride physisch/digitale Bildersammlungen nahtlos in den Arbeitsraum einbinden oder die Erstellung hypothetischer Einsatzszenarien neuer Produkte (Storyboards) direkt aus Rollenspielen heraus unterstützen.

- ▷ Innovative Produktentwicklung kann durch stimulierende Umgebungsbedingungen angeregt werden.
- ▷ Zur Unterstützung kreativer Entwicklungsprozesse sollten relevante Umweltinformationen (Markt, Umfeld, Unternehmen) und scheinbar lösungsfremde Informationen in geeigneter Form in der unmittelbaren Umgebung des Entwicklers dargestellt werden.

3.2.5 Produkte menschlicher Kreativität

Nach Urban (2004) entstehen im kreativen Prozess „Lösungsgestalten“, die in Produkte überführt werden. Kennzeichen dieser Produkte ist es, einerseits als neu, ungewöhnlich und überraschend erfasst und andererseits als sinnvoll erfahren werden zu können. (Urban, 2004, S. 34; vgl. auch Amelang & Bartussek, 1997; Dörner, 1999). Im Kontext der Produktentwicklung können dies Ideen, Konzepte oder materielle Produkte sein (vgl. Karwowski, 2006). Christiaans (2002)

konnte in Untersuchungen, in denen Design-Experten und Novizen studentische Entwürfe verschiedener Produkte zu bewerten hatten, zeigen, dass Kreativität tatsächlich als eigenständiges Produktmerkmal wahrgenommen wird. Zwar zeigten sich starke Zusammenhänge in der Einschätzung der Produktästhetik und des kreativen Werts, die Übereinstimmung zwischen den Beurteilenden (engl. *interrater agreement*) war jedoch gering. Trotzdem bestand hohe Einigkeit unter der Beurteilenden, wie sie zu ihren Einschätzungen gelangten. Danach werden Produkte als kreativ eingeschätzt,

- die überraschend wirken und Emotionen hervorrufen,
- in denen Form und Funktion geschickt und emotional und ästhetisch ansprechend verbunden wurden und
- bei denen eine Bereitschaft des Entwicklers zu erkennen war, neue Lösungen zu suchen und dafür Risiken einzugehen.

Obwohl der kreative Wert eines Produkts nur schwer objektiv eingeschätzt werden kann, da er stark abhängig vom Blickwinkel des bewertenden Individuums ist (vgl. Karwowski, 2006), wurde eine Reihe von Bewertungsmethoden entwickelt, die sich unabhängig vom Produktkontext einsetzen lassen. Grundsätzlich bieten diese die Möglichkeit, kreative Produktentwürfe schon früh im Entwicklungsprozess zu erkennen. Solche Methoden könnten aber auch Aufschluss über die Wirksamkeit kreativitätsunterstützender Werkzeuge geben, indem sie beispielsweise in vergleichenden Studien eingesetzt würden (Abschnitt 7.7, S. 156, und Abschnitt 9.6, S. 213).

Amabile (1983) empfiehlt, die Beurteilung des kreativen Wertes eines Produkts durch Experten der jeweiligen Domäne entsprechend deren eigenen Definitionen vornehmen zu lassen („Consensual Assessment"). Die Übereinstimmung zwischen den Experten ist bei dieser Methode in der Regel hoch, allerdings variieren die individuellen Entscheidungsbegründungen stark.

Die verbreitetste Methode zur Erhebung des kreativen Wertes eines Produkts ist die Creative Product Semantic Scale (CPSS; Besermer & O`Quin, 1986). Diese erhebt 55 Items in den Dimensionen Neuheit (originär, überraschend, befruchtend), Lösung (wertvoll, logisch, nützlich) und Ausarbeitung (organisch, elegant, komplex, verständlich, ausgearbeitet) mittels eines semantischen Differentials. Die Wirksamkeit dieses Fragebogens zur Diskriminierung verschiedener Produkte hinsichtlich der drei Faktoren wurde durch verschiedene Studien gestützt (vgl. u. a. Besemer & O'Quin, 1999; Christiaans, 2002).

Mit dem „Test zum schöpferischen Denken - Zeichnerisch (TSD-Z)" entwickelten Urban und Jellen (1995) ein Instrument zur Ermittlung persönlicher kreativer Fähigkeiten. Diese leiten sie aus dem kreativen Wert der im kreativen Prozess erstellten Produkte (hier Zeichnungen) ab. Das Verfahren wurde zwar zur Ermittlung von Persönlichkeitsmerkmalen entwickelt, kann darüber hinaus jedoch auch zur Bewertung des kreativen Wertes von Zeichnungen angewandt werden. Bei der Anwendung des TSD-Z werden den Studienteilnehmern Testblätter vorgelegt, die mit sechs einfachen figuralen Fragmenten versehen sind und in freier Entscheidung zeichnerisch vervollständigt werden sollen. Die Auswertung konzentriert sich vor allem darauf, ob und wie zwischen Figuren zeichnerische Verbindungen geschaffen werden, räumliche Grenzen überschritten werden, indem beispielsweise der vorgegebene Rahmen überzeichnet wird und ob die

Zeichnungen unkonventionell und nicht stereotyp sind. In vielfältigen Studien konnten signifikante Korrelationen zwischen den TSD-Z-Ergebnissen und weiteren Verfahren zur Ermittlung der persönlichen Kreativität und damit die Reliabilität des Verfahrens nachgewiesen werden (vgl. Urban, 2004).

3.2.6 Werkzeuge, Medien und Freiheitsgrade kreativer Externalisierungsprozesse

Der Begriff *Medium* ist sehr stark im alltäglichen Sprachgebrauch verankert, jedoch mit unterschiedlichsten Bedeutungen belegt (vgl. Hagen, 2005). Dies ist nach Winkler (2004) jedoch kein „Defekt, sondern zeigt an, dass der Medienbegriff vielfältige innere Spannungen enthält". In einer pragmatischen Sicht beschreibt Sandbothe (2003) Medien dreifach als sinnliche *Wahrnehmungsmedien*, semiotische *Kommunikationsmedien* und technische *Verbreitungsmedien*. Er betont jedoch, dass diese Medien in einer „gebrauchstheoretisch ausgerichteten" Sicht nicht strikt getrennt betrachtet werden dürfen. Vielmehr macht der Mehrfachcharakter von Medien (deren „dynamische Interferenzen"; a. a. O., S. 259) ihre Bedeutung aus. Nach Sandbothe stellen Wahrnehmungsmedien räumliche/zeitliche „Anschauungsformen" dar, die der Mensch über seine Sinnesorgane erfasst. Semiotische Kommunikationsmedien umfassen Zeichensysteme in Bildern, Sprache, Schrift, Zahlen bis hin zu Musik, Berührungen, Gestik, Mimik oder Tanz. Zu den technischen Verbreitungs-, Verarbeitungs- und Speichermedien zählen nach Sandbothe beispielsweise Buch, Film und das Internet aber auch „Artikulationsorgane", das Gehirn, der Körper, Licht und Schall sowie Stein und Papyrus (ebd.)

Die Medien des Skizzierens und des skizzierenden Modellierens sind *innere Bilder, Gesten, Zeichnungen, Collagen* und *physische Modelle* (Abschnitte 2.1.2, S. 17, und 3.1.6, S. 46). Diese Medien können aufgrund ihrer vielfältigen Funktionen wie der Unterstützung des Externalisierens und Reflektierens, der Unterstützung der Kommunikation und der Dokumentation allen drei der von Sandbothe genannten Medientypen zugeordnet werden (Wahrnehmungsmedien, Kommunikationsmedien, Verbreitungsmedien). In Anlehnung an Sandbothes Frage, wie Veränderungen im Bereich der Medien zu einer „Reorganisation (…) unseres kulturellen Selbst- und Weltverständnisses beitragen" (Sandbothe, 2003, S. 259), kann hinsichtlich kreativer Produktentwicklungsprozesse gefragt werden, inwieweit Neu- und Weiterentwicklungen von Modellierungswerkzeugen und Darstellungstechnologien zu Veränderungen des schöpferischen Selbstverständnisses von Entwicklern und zur Reorganisation der Entwurfstätigkeiten beitragen können.

▷ Verändern neue Skizzier- und Modelliermedien das schöpferische Selbstverständnis des Entwicklers?

Da kreative Prozesse und insbesondere Skizzierprozesse wie beschrieben in hohem Maß reflexiv sind, hat die Eignung des jeweiligen Mediums, Ideen und Lösungsschritte des Handelnden aufzunehmen und wiederzugeben, einen wesentlichen Einfluss auf den Prozess und die entstehenden äußeren und inneren Bilder. Die spezifische Wirkung eines Mediums auf den kreativen Prozess ist davon abhängig, wie befähigt der Handelnde ist, das Verarbeitungsmedium zu manipulie-

ren und inwieweit das Medium auf Manipulationen erwartungskonform reagiert. Da im Abtragen (Externalisieren) und Wahrnehmen jeder Selbstkommunikationsprozess wie in Abschnitt 3.1.5 (S. 43) beschrieben Informationsverlust und Störinformationen ausgesetzt ist, weichen intendierte und wahrgenommene Informationen zwangsläufig stets voneinander ab. Je höher dieser medienspezifische Informationsverlust (Äquivokation) oder die Störungen sind, desto größer ist auch die Abweichung des externalisierten Bildes von der ursprünglichen Intention des Entwicklers. Dieser Effekt kann insbesondere in divergenten Phasen lösungsförderlich sein, wenn beispielsweise eine Strichzeichnung verschwimmt und das neue Assoziationen beim Designer weckt. Im umgekehrten Fall geringer Äquivokation und Störungen lassen sich entsprechende Medien für die präzisere Ausarbeitung innerer Bilder nutzen, was wiederum in konvergenten Phasen unterstützend wirken kann.

Wesentliche Kriterien kreativer Prozesse sind in mehrfacher Hinsicht deren *Freiheitsgrade*. Unter Freiheitsgraden versteht man diejenigen Parameter eines Systems, die nötig sind, um es vollständig zu beschreiben. Kreative Prozesse können

- nach den Freiheitsgraden der verwendeten Medien,
- nach den Freiheitsgraden der eingesetzten Werkzeuge,
- nach den Freiheitsgraden der menschlichen Hand und
- und nach den Freiheitsgraden der zu lösenden Aufgaben

kategorisiert werden. Häufig werden *räumliche Freiheitsgrade* angegeben, beispielsweise zwei räumliche Freiheitsgrade des Skizzierens mittels eines Stifts auf Papier, drei räumliche Freiheitsgrade der Modellierung plastischer Produkte, sechs räumliche Freiheitsgrade (drei rotatorische, drei translatorische) der Bewegung starrer Werkzeuge im Raum und 21 räumliche Freiheitsgrade der Bewegungen der Hand samt aller Finger (Wilson, 1998). Hinkley (1994b) legt dar, dass die Schwierigkeit der Lösung einer Aufgabe in der Regel um so höher ist, je höher der räumliche Freiheitsgrad der Aufgabe, des Mediums oder der eingesetzten Werkzeuge ist. Um die Lösung von Aufgaben so einfach wie möglich zu halten schlägt er vor, die räumlichen Freiheitsgrade der Werkzeuge und des Mediums auf die Freiheitsgrade der Aufgabe zu beschränken oder sogar noch weiter zu senken. Beispielsweise wäre zum Positionieren eines dreidimensionalen Objekts eine modale zweidimensionale Interaktionstechnik mit einer Computermaus einzusetzen, das heißt für eine Aufgabe mit drei räumlichen Freiheitsgraden ein Werkzeug mit zwei räumlichen Freiheitsgraden zu nutzen, und dieses zeitlich verteilt auf die drei Freiheitsgrade der Aufgabe abzubilden.

Sandbothe schlägt vor, Medien „nicht auf den semantischen Vermittlungsaspekt zu reduzieren, sondern darüber hinaus den *Werkzeugcharakter von Medien* ernst zu nehmen“ (Sandbothe, 2003, S. 259). Werkzeuge wie Stifte, Lineale, Spachtel und CAD-Systeme werden von Menschen genutzt, um neue Freiheitsgrade für die Bearbeitung von Medien zu gewinnen, die mit den bloßen Händen nicht erreicht werden können. Andererseits können Werkzeuge auch dazu dienen, Freiheitsgrade einzuschränken, um so Aufgaben zu vereinfachen, z. B. Lineale beim manuellen Zeichnen oder automatisierte Zeichenfunktionen beim Gebrauch von CAD-Programmen (Pache, 2005).

Zusammenfassend lässt sich folgern:

▷ Die Freiheitsgrade der Medien und Werkzeuge eines Unterstützungssystems sollten für divergente Aufgaben vergleichsweise hoch, für konvergente Arbeiten vergleichsweise niedrig sein.

Besonderes Potenzial zur Unterstützung kreativer und innovativer Prozesse sieht Shneiderman (2000; 2002a) in rechnergestützten Werkzeugen, die alle Phasen und typische Aktivitäten kreativer Prozesse berücksichtigen. Als Ergebnis mehrerer Expertendiskussionen schlagen Shneiderman et al. (2006) folgende Gestaltungsprinzipien für derartige Werkzeuge vor:

- Unterstützung von Exploration und Suche, beispielsweise nach fremden Arbeiten mit inhaltlichem Bezug, aber auch nach eigenen Arbeiten
- Verwirklichung geringer Eintrittsbarrieren für Novizen, gleichzeitig umfangreiche Arbeitsmöglichkeiten für Experten
- Unterstützung vieler Lösungswege und -stile
- Anbieten umfangreicher Möglichkeiten zur Visualisierung von Entwurfszwischenprodukten sowie deren physisch/materieller Ausgestaltung
- Anbieten umfassender Möglichkeiten, den Entwicklungsprozess zu speichern und rekapitulieren zu können
- Unterstützung kollaborativen Arbeitens und offener Austauschformen
- Realisierung besonders einfacher Gebrauchsmöglichkeiten

An die Entwicklung rechnergestützter Werkzeuge zur Unterstützung der Kreativität stellen Shneiderman et al. (2006) folgende Kriterien:

- Einführung nur solcher Lösungen, die die Entwickler der Werkzeuge auch selber nutzen würden
- Ausbalancierte Berücksichtigung von Benutzervorschlägen und eigener Beobachtung
- Integration der avisierten Benutzer in einen partizipativen Entwicklungsprozess; Durchlaufen mehrerer Iterationsstufen und Evaluationen
- Entwicklung mit Blick auf Designer und Konstrukteure

Vor dem Hintergrund der generellen Bedeutung von Werkzeugen für die Herausbildung von Fertigkeiten (vgl. Luria & Vygotsky, 1992) schließt sich eine im weiteren Verlauf der Arbeit zu beantwortende Frage an: Die Frage danach, ob neue virtualisierte Werkzeuge und Hilfsmittel Entwickler unterstützen können, ihre Fertigkeiten im kreativen Entwicklungsprozess auszuschöpfen, neue kreative Lösungsfertigkeiten auszubilden und weitere zu entwickeln.

3.3 Zusammenfassung

Zu Beginn dieses Kapitels wurde Skizzieren als eine besonders geeignete Methode dargestellt, das „opportunistische Vorgehen mit systematischen Episoden“ (Hacker, 2002, S. 14) zu unterstützen, welches ein wichtiges Kennzeichen des erfolgreichen konstruktiven Entwickelns ist. Anschließend wurden einige kognitive Unterstützungsfunktionen des Skizzierens dargestellt. Dazu zählen insbesondere die Entlastung des Arbeitsgedächtnisses, die Integration innerer und äußerer Vorstellungsbilder und der Wechsel zwischen innerem und äußerem Handeln. Schließlich wurden neben der Skizze auch andere Formen äußerer Lösungsdarstellungen wie Gesten und Modelle beschrieben, die sich hinsichtlich Fixierung und Mehrdeutigkeit von Skizzen unterscheiden.

Das Forschungsfeld Kreativität konnte in diesem Kapitel nur gestreift werden. Als zentrales Modell wurde das „4 P-U Modell“ von Urban (1993) eingeführt, in dem kreatives Handeln in den Kontext von Problem, Person, Prozess, Produkt und Umwelt gesetzt wird. Aus diesen Faktoren wurden anschließend Anforderungen an digitale Unterstützungswerkzeuge abgeleitet, beispielsweise dass diese den Selbstkommunikationsprozess durch flüssiges Interagieren ermöglichen, Umweltinformationen integrieren, die Motivation des Entwicklers fördern und Werkzeuge und Medien mit vielen Freiheitsgrade bereitstellen sollten.

Im folgenden Kapitel 4 werden nun ergonomische und systemtechnische Aspekte von Mensch-Maschine-Interaktionskonzepten vorgestellt und hinsichtlich der genannten Anforderungen diskutiert. Entsprechend der Integrationsaufgabe dieser Arbeit stehen dabei Mixed Reality-Systeme und Tangible User Interfaces im Fokus. Deren besonders großes Unterstützungspotenzial für kreative Selbstkommunikationsprozesse wird in Kapitel 6 in Hypothesen formuliert und in den Kapiteln 7-9 evaluiert.

4
Mixed Reality und Tangible User Interfaces: Neue Konzepte der Mensch-Maschine-Interaktion zur Unterstützung kreativer Interaktions- und Selbstkommunikationsprozesse

the modern human brain might have evolved as a consequence of the increase in tool use
Wilson (1998, S. 15)

Können neue, virtuelle Medien und Werkzeuge kreatives Skizzieren und Entwerfen unterstützen? Bevor diese Frage in den Kapiteln 7 bis 9 empirisch untersucht und evaluiert wird, diskutiert dieses Kapitel zuerst die Grundlagen der Interaktion mit neuen Technologien. Im Zentrum der Diskussion steht das Zusammenwirken von virtuellen und physischen Umgebungen und Objekten.

In den folgenden Abschnitten wird zunächst auf ergonomische und systemtechnische Aspekte der Mensch-Maschine-Interaktion eingegangen. Anschließend werden die Interaktionskonzepte Virtual- und Mixed Reality (VR, MR) und Tangible User Interfaces (TUI) vorgestellt. Darauf aufbauend wird ein Kontinuum virtueller, hybrider und physischer Interaktionsumgebungen diskutiert und hinsichtlich ergonomischer Aspekte für basale Interaktionstechniken ausgelegt. Dieses Vorgehen basiert auf der Annahme, dass die Gebrauchstauglichkeit einer VR-Anwendung wie beispielsweise dem immersivem dreidimensionalem Skizzieren entscheidend von basalen Interaktionsaufgaben wie Positionieren, Rotieren und Greifen bestimmt wird (canonical manipulation tasks, vgl. Bowman et al., 2004).

4.1 Wahrnehmungsbezogene Faktoren der Interaktion in hybriden physisch/virtuellen Räumen

Als Vorbereitung der späteren Diskussion hybrider Interaktionsumgebungen sollen in den folgenden Abschnitten zunächst einige psychische und physische Faktoren eingeführt werden; dazu zählen das räumliche Sehvermögen, motorische Fertigkeiten insbesondere der Hand und die multisensorische Integration.

4.1.1 Räumliches Sehen

Der Mensch ist in der Lage, aus dem Licht, das auf die Netzhaut der Augen fällt, eine räumliche Vorstellung der dreidimensionalen Struktur seiner Umgebung und der darin enthaltenen Objekte zu entwickeln. Marr (1982; zit. n. Anderson, 1996) schlägt ein mehrstufiges Modell des Informationsflusses der räumlichen Wahrnehmung vor (vgl. Abbildung 18): Dem zufolge werden die auftreffenden Lichtreize in neuronale Informationen umgewandelt, in denen in frühen sensorische Prozessen erste Kennzeichen wie Kanten, Balken und Muster erkannt werden. Es entstehen sogenannte Primärskizzen.[1] Durch die Auswertung von Tiefeninformationen (engl. *depth cues*) der Primärskizzen kann eine innere Repräsentation der Lage von Oberflächen im Raum generiert werden, welche Marr als 2½D-Skizze bezeichnet. In einem nachgelagerten Prozess werden aus den Oberflächen gemäß verschiedener Prinzipien, beispielsweise der Gestaltgesetze (Wertheimer, 1912; zit. n. Anderson, 1996) oder anhand von Invarianten (Gibson, 1982; Abschnitt 4.1.2, S. 64) zusammenhängende Objekte erkannt, die in sogenannten 3D-Skizzen repräsentiert werden. Die Elemente der 3D-Skizzen sind der bewussten Informationsverarbeitung des Menschen zugänglich und erlauben die semantische und kontextuelle Verknüpfung mit anderen Objekten, beziehungsweise dem Vorwissen des Benutzers.

Als die wichtigsten derzeit bekannten Tiefeninformationen, anhand derer der kognitive Apparat des Menschen auf die räumlichen Verhältnisse seiner Umgebung und der darin enthaltenen Objekte schließt, können die folgenden genannt werden (vgl. u. a. Anderson, 1996; Sun & Perona, 1996; Todd, 2004; Ware, 2004; Arsenault & Ware, 2004):

1. *Monokulare Tiefeninformationen:* Diese werden aus einzelnen statischen Bildern gewonnen; viele der genannten Tiefeninformationen können beispielsweise in Strichskizzen durch Darstellungen von Objektkanten und Linien erzeugt werden:

- *Lineare Projektion* (auch zentralperspektivische Projektion): Die wahrgenommenen Punkte der Umgebung werden strahlenförmig auf die Netzhaut des Betrachters projiziert (vgl. Abbildung 25). Dies hat beispielsweise zur Folge, dass entfernte Objekte kleiner als nahe Objekte abgebildet werden, parallel verlaufende horizontale und vertikale Linien zum Bildmittelpunkt hin konvergieren und Oberflächendetails und -strukturen mit zunehmendem Abstand kleiner werden.

[1] Der Begriff Skizze steht hier in keinem Zusammenhang zu äußeren Zeichnungen oder Bildern, sondern beschreibt mentale Repräsentationen visueller Informationen.

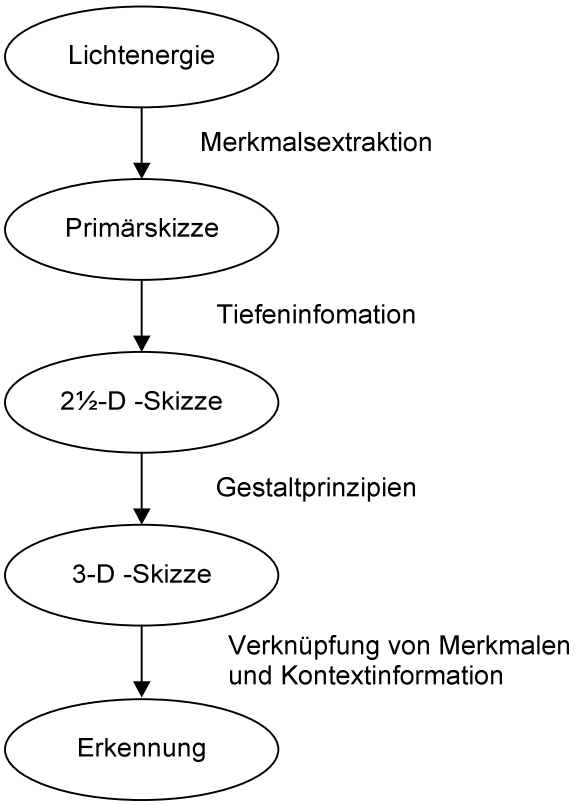


Abbildung 18: Der Informationsfluss vom Lichtreiz bis zur perzeptuellen Repräsentation (aus Anderson, 1996, S. 71).

- *Gradienten von Oberflächentexturen*: Deren Ausrichtung und Anstieg erklärt die Formstruktur von Objekten. Texturelemente scheinen außerdem mit wachsender Entfernung dichter beieinander zu liegen
- *Verdeckung (engl. occlusion):* Die räumliche Stellung von Objekten kann anhand gegenseitiger Verdeckungen erkannt werden. Wenn Objekte in Blickrichtung des Betrachters hintereinander liegen, verdecken näher liegende Objekte stets entfernter liegende. Aus den Verdeckungsmustern werden Tiefeninformationen abgeleitet.
- *Schatten*: Aus Schattenwürfen können wichtige Informationen über die Positionierung der Objekte untereinander und über ihre Höhe und Abstand zur Grundfläche abgeleitet werden.
- *Schattierungen*: Schattierte Objektoberflächen unterstützen das Erkennen der Objektform, beispielsweise von Erhebungen und Krümmungen.
- *Schärfentiefe*: Das menschliche Auge kann nur in einem begrenzten Bereich deutlich (scharf) sehen. Um Objekte verschiedener Tiefe deutlich wahrnehmen zu können, muss die Augenlinse in Abhängigkeit von der Objektentfernung gekrümmt werden. Alle deutlich erkennbaren Objekte liegen somit in räumlicher Nähe, undeutlich (verschwommen) wahrgenommene Objekte dagegen weiter entfernt beziehungsweise näher. Aus diesen Informationen werden Hinweise über die Tiefe der betrachteten Objekte abgeleitet.

- *Akkomodation*: Um Objekte in verschiedener Entfernung scharf auf die Retina zu projizieren (zu fokussieren) wird die Augenlinse durch die Augenmuskeln gespannt, beziehungsweise gelockert (vgl. Abbildung 19). Die Eigenwahrnehmung des Zustands der Augenmuskel, gelockert für entfernte Objekte, gespannt für nahe Objekte, fließt in die Bewertung der Größe nebeneinander liegender Objekte ein.

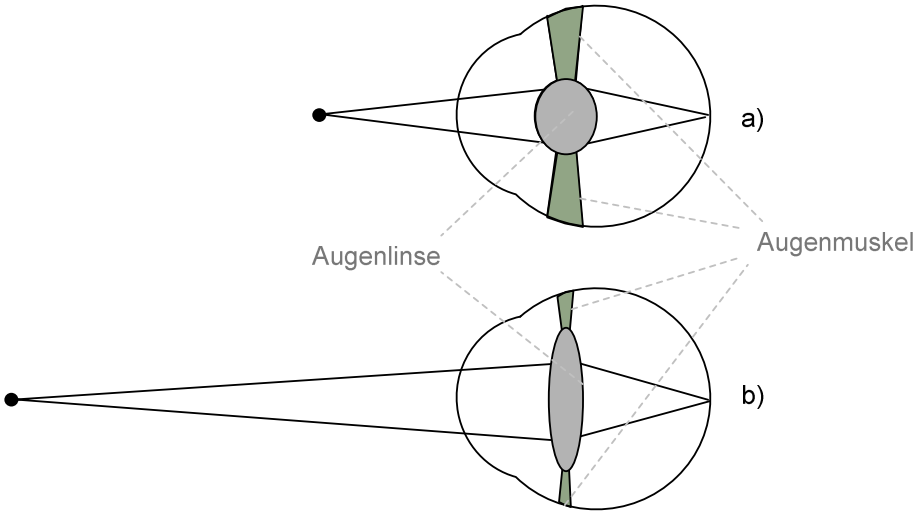


Abbildung 19: Akkomodation a) nah und b) fern liegender Objekte.

2. Dynamische Tiefeninformationen: Diese werden aus mehreren zeitlich aufeinanderfolgenden Bildern gewonnen:

- *Bewegungsparalaxe*: Bewegungen des Kopfes führen zu Veränderungen der wahrgenommenen Objektpositionen und der Ausdehnungen auf der Netzhaut; dem Betrachter nahe liegende Objekte bewegen sich schneller als weiter entfernt liegende. Aus den Positionsänderungen werden Tiefeninformationen abgeleitet.

3. Binokulare Tiefeninformationen: Diese werden aus den in beiden Augen wahrgenommen Bildern generiert:

- *Disparität*: Da sich die Sichtfelder der Augen des Menschen überschneiden, nehmen beide Augen leicht unterschiedliche Bilder mit ähnlichem Inhalt wahr. Die Unterschiede in beiden Bildern werden genutzt, um Tiefeninformationen der darin enthaltenen Objekte zu generieren. Disparität ist eine der wichtigsten Quelle der Tiefenwahrnehmung (vgl. Abbildung 25).
- *Konvergenz*: Um Objekte wahrnehmen zu können, lassen die Augenmuskeln die Augen rotieren, so dass beide Augen auf dasselbe Objekt gerichtet sind. Die Orientierung der beiden Augen und die Spannung der Augenmuskel im linken und rechten Auge gibt Aufschluss über die Tiefe des betrachteten Objekts. Bei der Betrachtung nah liegender Objekte konvergieren

die Rotationswinkel der Augen, bei entfernt liegenden Objekten divergieren sie (vgl. Abbildung 20).

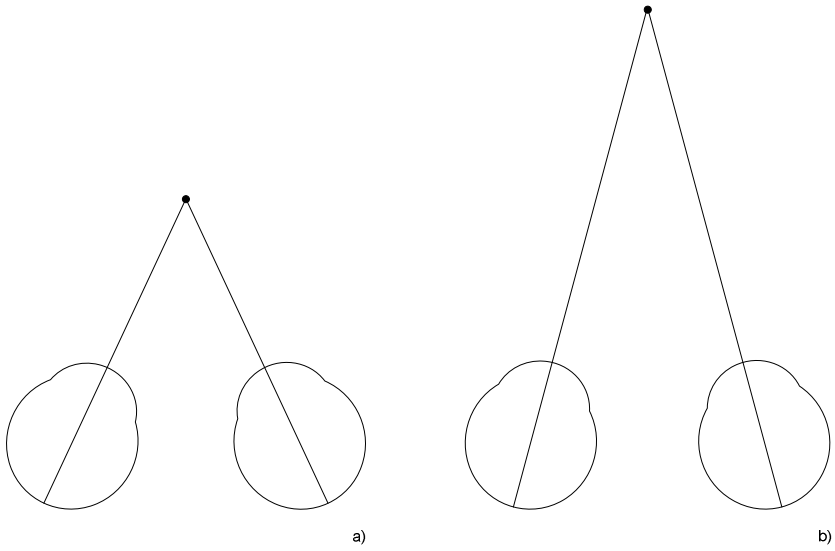


Abbildung 20: Konvergenz der Augenrotation während der Fokussierung a) nah und b) fern liegender Objekte.

Räumliche Wahrnehmung ist jedoch nicht ausschließlich mit physikalischen Parametern zu erklären. Im „ökologischen Ansatz der Wahrnehmung" unterstreicht Gibson (1979), dass die isolierte Untersuchung von Reizen keine angemessene Erklärung der menschlichen Wahrnehmung und des Verhaltens ermöglicht. Er betont stattdessen die Verschränktheit von Wahrnehmung und Handlung. Demzufolge sind die Handlungsmöglichkeiten in den Objekten und Ereignissen der Umwelt bereits enthalten und in deren physischen Eigenschaften kodiert. Ihre Wahrnehmung und Entdeckung erfolgt in einem aktiven Prozess, der dadurch selbst zur Handlung wird. Gibson bezeichnet die Handlungsmöglichkeiten, die sich dem Mensch durch die wahrgenommenen Objekte oder Informationen bieten, als *Affordances*. Sie werden auch als Anbietungen oder Handlungs-Aufforderungen der Objekte beschrieben, wie beispielsweise sich auf einen Stuhl zu setzen oder eine Treppe hinaufzusteigen.[1]

Das Erkennen der Affordances eines Objekts ist an die Erkennung seiner räumlich und zeitlich *invarianten* Eigenschaften wie Objektgröße und -struktur geknüpft. Nach dem ökologischen Ansatz von Gibson geschieht dies in einem aktiven Prozess, in dem alle Wahrnehmungssysteme zusammenarbeiten und sich der Mensch aktiv in seiner Umwelt bewegt, um nützliche Informationen zu entdecken. Die aktive Erkundung wird ebenso vom visuellen System wie von haptischen Rückmeldungen gesteuert. Der Hand als Erkundungs- *und* Handlungsorgan kommt dabei eine bestimmende Funktion zu (Gibson, 1982S. 160).

[1] Die Bedeutung der Affordances für die Gestaltung von „natürlichen" Mensch-Maschine-Schnittstellen wurde u. a. von Norman (1988; 1990) beschrieben.

4.1.2 Die Hand, haptische Wahrnehmung, Greifen und Manipulieren von Objekten

Die Hände sind die wichtigsten Werkzeuge des Menschen, um einerseits Objekte tastend (taktil) zu erfassen und andererseits Objekte zu manipulieren (vgl. u. a. Wilson, 1998). Aus anatomischer Sicht sind die Hände die Orte des menschlichen Körpers mit den meisten Knochen und Sehnen. Bei komplexen Handlungsausführungen sind viele davon mehrfach pro Sekunde aktiv und führen unterschiedliche Bewegungen aus. Auch die Auflösung des Tastsinns ist in den Händen und Fingerspitzen am höchsten. Die Rezeptoren in der Haut der Hände sind auf dem somatosensorischen Kortex, dem Teil des Gehirns, der verantwortlich für die taktile Objekterkennung ist, überproportional stark repräsentiert (vgl. Goldstein, 2008). Durch das Trainieren bestimmter manueller Tätigkeiten kann sich die kortiale Repräsentation der beteiligten Glieder sogar noch weiter ausdehnen, wodurch sich auch deren taktile Sensibilität erhöht (dieses Phänomen wird als erfahrungsabhängige bzw. neuronale Plastizität bezeichnet). So sind beispielsweise bei erfahrenen Geigenspielern die Finger der Hand, mit denen sie die Saiten greifen, überdurchschnittlich groß auf dem Kortex repräsentiert (Elbert et al., 1995; zit. n. Goldstein, 2008).

Um Objekte zu erkennen, werden die motorischen Bewegung der Hand, die sensorischen Wahrnehmungen der Hautempfindungen sowie Informationen und „Überlegungen" des kognitiven Systems über das Ertastete koordiniert (vgl. Goldstein, 2008). Gibson (1962) stellt das Erleben der Objektberührungen während der Objekterkennung grundsätzlich unterschiedlich hinsichtlich *passiver* und *aktiver Berührungen* dar. Passives Berühren, bei dem die Bewegungen lediglich vom berührten Objekt ausgehen und der Berührte „still" bleibt und keine eigenen Bewegungen ausführt, werden vorrangig als Reizung der Hautsinne erlebt. Aktives Berühren, während dessen die Hand beispielweise abtastend oder streichend über Oberflächen bewegt wird, lässt beim Mensch dagegen eine Vorstellung des berührten Objekts und seiner Beziehung dazu entstehen. Die während des aktiven Berührens ausgeführten Bewegungen werden auch als haptische Explorationsbewegungen bezeichnet, typische Bewegungen sind das Hin- und Herbewegen der Finger auf der Objektoberfläche, Druck auf das Objekt, Umfassen des Objekts und Verfolgen der Objektkontur. Durch aktives Berühren sind Menschen in der Lage, bekannte Objekte innerhalb von zwei Sekunden zu erkennen (Lederman & Klatzky, 1987; zit. n. Goldstein, 2008).

▷ Aktives Berühren verbessert die Erkennung und damit die Handhabbarkeit von Objekten.

Die Aktivitäten der Hand zur Manipulation von Objekten unterscheidet man nach Napier (1956; zit. n. Wilson, 1998) in greifende Bewegungen, in denen die Hand das Objekt ganz oder teilweise hält, und in nicht greifende Bewegungen, in denen das Objekt zwar durch die Finger manipuliert aber nicht gehalten wird (engl. *prehensile, non-prehensile movements*). Napier unterscheidet weiterhin zwei typische Griffformen, den kräftigen Griff, bei dem das Objekt in der Handfläche liegt, und den Präzisionsgriff, der das Objekt zwischen Daumen und Fingern hält (engl. *power grip, precision grip*, vgl. Abbildung 21). Der kräftige Griff wird gebraucht, wenn in der Handlung eine hohe Kraftübertragung nötig ist; in der Regel werden dabei auch Bewegungen des gesamten Körpers einbezogen, beispielsweise des Oberarms beim Werfen eines Objekts. Der Präzisions-

griff wird mit einer Vielzahl von Fertigkeiten verbunden, bei denen der Mensch präzise arbeitet und dazu kleine Werkzeuge einsetzt. Schreiben und Zeichnen sind typische Handlungen, die mittels eines Präzisionsgriffs ausgeführt werden (vgl. Wilson, 1998).



Abbildung 21: Zwei Greifformen: Kräftiger Griff (links), Präzisionsgriff (rechts).

Das Greifen und die Manipulation eines Objekts sind eng miteinander verbunden. Die Griffform wird nicht nur durch die Form des Werkzeugs oder des zu greifenden Objekts, sondern auch durch die Aufgabe oder das Ziel der Manipulation bestimmt (Napier, 1956; zit. n. Wilson, 1998). Will man beispielsweise einen Stift zum Schreiben benutzen, ergreift man ihn ganz anders, als wenn man vor hat, damit ein Loch zu bohren. Smeets und Brenner (1999) konnten in Untersuchungen zeigen, dass sich die Form des Handgriffs schon während der Bewegung der Hand auf das Objekt hin so ausrichtet, dass dieses hinsichtlich der geplanten Manipulation und seiner visuell geschätzten Masseverteilung optimal gegriffen werden kann. Greif- und Manipulationsbewegung können somit unmittelbar ineinander übergehen (im Gegensatz zu getrennten Selektions- und Manipulationshandlungen in den meisten heutigen grafischen und VR-basierten Benutzungsschnittstellen, Abschnitt 4.3, S. 70, bis Abschnitt 4.5, S. 93). Greifen ist nach Piaget (1969) auch wesentlich an der Herausbildung des abstrakten Objektverständnisses von Kindern beteiligt. Durch die Anpassung der Handform an die Form eines ergriffenen Objekts kann dieses emotional verstanden und kategorisiert werden. Im späteren Entwicklungsverlauf kann das Auge den Tastsinn in dieser Funktion ablösen, das Auge kann die Hand „entlasten“ (Petruschat, 2001a, S. 29). In modernen kognitiven Theorien wie der Embodied Cognition Theorie werden solche unmittelbaren sensumotorischen Erfahrungen sogar zur Voraussetzung jedes geistigen Verständnisses erklärt, auch des Verständnisses abstrakter Symbole und Sprache (vgl. u. a. Pecher & Zwaan, 2005). Die Wahrnehmung der physischen Umwelt und des eigenen Körpers prägt demnach auch das Denken des Erwachsenen in elementarer Weise. Die Entwicklung fühlbarer Mensch-Maschine-Schnittstellen scheint aus dieser Perspektive folgerichtig (Abschnitt 4.5, S. 93).

Zusammenfassend kann festgehalten werden:

- Menschen nutzen sowohl visuelle als auch taktile Reize bei der aktiven Exploration von Objekten. Dabei verfolgen sie keine fixe Strategie, sondern passen diese dynamisch der Situation an.

- ▷ Objekterkennung und Handlung sind untrennbar miteinander verbunden.
- ▷ Greifen und Manipulation physischer Objekte, z. B. Werkeuge, gehen unverzögert ineinander über.
- ▷ Um präzise zu arbeiten, werden Werkzeuge in der Regel zwischen Daumen und Fingern gehalten (Präzisionsgriff; vgl. a. Kräftiger Griff).

4.1.3 Multisensorische Integration

Die in den verschiedenen sensorischen Systemen generierten Informationen werden im Gehirn zusammengeführt. Untersuchungen des Zusammenwirkens visueller und haptischer Informationen bei der Objekterkennung lassen die Vermutung zu, dass haptische und visuelle Reize in den selben kortealen Gebieten verarbeitet werden, beziehungsweise auch haptische Informationen intern visuell repräsentiert werden (vgl. u. a. Easton et al., 1997; Ernst, 2000; Ernst & Lange, 2007).

Obwohl die Erkennung von Objekten von der visuellen Modalität dominiert wird, kann haptische Exploration wichtige Informationen zu Form und Textur und damit zur Erkennung der Objekte beisteuern (vgl. James et al., 2007). Ernst und Banks (2002) konnten zeigen, dass der Grad des Rauschens der sensorischen Informationen deren Gewichtung bei der Integration beeinflusst. Liefert beispielsweise der visuelle Sinn aufgrund schlechter Sichtverhältnisse (oder in rechnerbasierten Systemen aufgrund schlechter Auflösung, Abschnitt 4.3.2, S. 72, und Abschnitt 4.4.3, S. 86) verrauschte Informationen, der haptische Sinn dagegen wenig verrauschte Informationen (beispielsweise bei der Manipulation fester physischer Objekte), werden die Gewichte des weniger verrauschten Sinneskanals erhöht.

- ▷ Haptische Objektwahrnehmung kann die visuell dominierte Objekterkennung unterstützen.

Haptische und visuelle Aufmerksamkeit müssen nicht stets auf demselben Objekt ruhen. So kann die Hand ein Objekt manipulieren oder ertasten, während die Augen ein anderes betrachten (vgl. Wickens et al., 1998). Ernst und Lange (2007) konnten in Untersuchungen zeigen, dass die Strategien zum aktiven Einsatz des haptischen und visuellen Sinns für die Objekterkennung nicht starr sind, sondern situativ anhand des Vorwissens, der Lage des Objekts, seiner Form und der Aufgabe angepasst werden.

Typischerweise werden objektspezifische Reize in natürlichen Umgebungen gleichzeitig und am gleichen Ort wahrgenommen. Viele sensumotorische Funktionen wie beispielsweise die Auge-Hand-Koordination sind von dieser Synchronizität abhängig; wird sie verletzt, führt dies in der Regel zu Leistungseinbußen (Abschnitt 4.4.1, S. 85). Diese Synchronisierung bzw. Kalibrierung der menschlichen Sinne wird in frühen Jahren erlernt. Kommt es zu Veränderungen am sensori-

schen Apparat, beispielsweise aufgrund entwicklungsbedingter Veränderungen des visuellen Systems, können sich Menschen diesen Veränderungen flexibel anpassen, so dass eine einheitliche Objektwahrnehmung gewährleistet bleibt. Wenn visuelle und taktile Reize zeitlich auseinander fallen, bleiben Differenzen von bis zu 30 ms ohne Auswirkung auf die Leistung (vgl. Levitin et al., 2000). Aufgrund der besseren zeitlichen Auflösung taktiler Reize dominiert in diesen Fällen der taktile Sinn (zeitliche Auflösung ca. 1000 Hz) den visuellen Sinn (ca. 20 Hz, vgl. Violentyev et al., 2005). Bei zeitlich synchronen, aber räumlich von einander getrennten visuo-haptischen Stimuli dominiert der visuellen Sinn den haptischen auf Grund seiner besseren räumlichen Auflösung (vgl. Ramachandran & Blakeslee, 1998; Congedo et al., 2006). Dadurch wird der haptische Reiz dem visuellen räumlich angepasst.

▷ Ein räumlicher oder zeitlicher Versatz der Wahrnehmung von Sinnesreizen verschiedener Modalitäten führt zur Verschlechterung der Performanz, kann aber in bestimmten Grenzen ausgeglichen werden.

Im diesem Abschnitt wurde auf einige menschlichen Faktoren der Mensch-Maschine-Interaktion eingegangen, die im Rahmen des immersiven dreidimensionalen Skizzierens besondere Bedeutung haben. Um später den Forschungsbedarf formulieren zu können, soll im folgenden Abschnitt vorbereitend eine Analyse und Abgrenzung physischer Interaktion von weiteren Interaktionsformen anhand semiotischer Modelle der Mensch-Maschine-Interaktion erfolgen.

4.2 Ebenen der Mensch-Maschine-Interaktion

Mensch-Maschine-Interaktion (MMI) vollzieht sich in Mensch-Maschine-Systemen (MMS) in einer rückgekoppelten Beziehung durch prozessorientierten Umsatz von Energie, Stoffen und Signalen. Weitere Austauschprozesse vollziehen sich auch zwischen dem MMS und seiner räumlichen, technischen und organisatorischen Umgebung (vgl. Timpe & Kolrep, 2002; Rötting, 2005). Die Schnittstelle der Interaktion bildet der sensorische und motorische Apparat auf der Seite des Menschen und die Sensorik, Anzeigen, Effektoren und passiv rückkoppelnden Elemente auf der Seite der technischen Systeme.

Um als Voraussetzung für deren Weiterentwicklung eine systematische Analyse bestehender Mensch-Maschine-Interaktionskonzepte durchzuführen, bietet sich die Anwendung von Taxonomien in Form semiotischer Interaktionsmodelle an (vgl. Buxton, 1983; Foley & van Dam, 1982; Nielsen, 1986). Diese Modelle trennen die Ziele und Aufgaben des Benutzers und die notwendigen (abstrakten) Funktionen von der Interaktionskodierung im konkreten System. In Nielsens (1986) siebenstufigem semiotischen Modell (vgl. Abbildung 22) steht zuoberst das Ziel des Benutzers (7), woraus sich die zu lösende Aufgabe ableitet (6). Auf der semantischen Ebene (5) sind die Funktionen des Systems angesiedelt. Diese drei Ebenen bilden zusammen das Sachproblem (vgl. Streitz, 1986), das unabhängig von einer konkreten technischen Lösung besteht. Um die Funktionen auszulösen, müssen Interaktionstoken (3) beziehungsweise -wörter, die sich aus ei-

nem Interaktionsalphabet (2) zusammen setzen, entsprechend einer Syntax (4) an der Schnittstelle generiert werden. Erst auf der untersten physikalischen Ebene (1) wird physische Energie übertragen. Die vier untersten Ebenen bilden das Interaktionsproblem (vgl. Streitz, 1986), das der Benutzer zur Lösung des Sachproblems in einem konkreten technischen System zusätzlich zu lösen hat. Während der Interaktion zwischen Mensch und Maschine findet auf jeder Ebene ein Informations- bzw. Energieaustausch statt, jedoch in Abhängigkeit vom konkreten System und Anwendungsfall mit unterschiedlicher Gewichtung und Bandbreite.

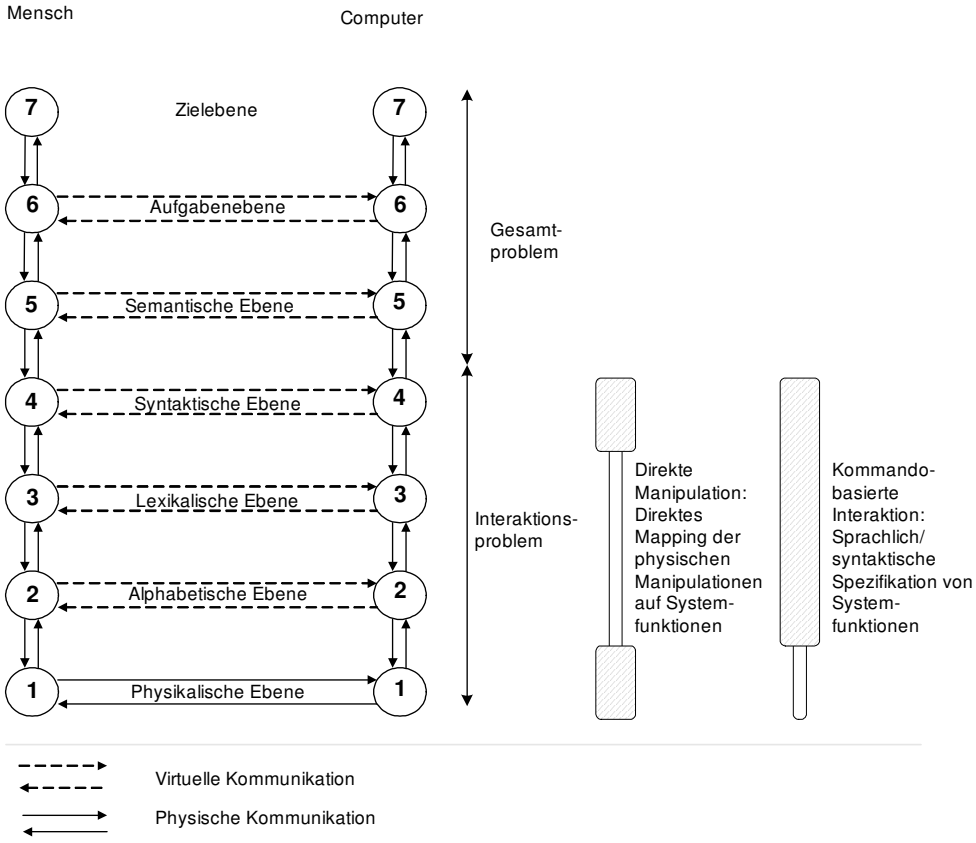


Abbildung 22: Semiotisches Modell der Mensch-Maschine-Interaktion (nach Nielsen, 1986; und Streitz, 1986).

Aus der Sicht semiotischer Interaktionsmodelle wird deutlich, dass ein und dasselbe Sachproblem mit verschiedenen technischen Systemen auf gänzlich unterschiedliche Weise gelöst werden kann. Beispielsweise kann die Konstruktion eines Bauteils mittels eines menübasierten Desktop CAD-Systems verschiedene Mausbewegungen und -klicks (Ebene 1: physisch) auf Menüeinträge (Ebenen 2 und 3: alphabetisch und lexikalisch) in einer bestimmten Reihenfolge (Ebene 4: syntaktisch) erfordern. Die Interaktion basiert hier insbesondere auf der Auswahl von Menüeinträgen, Kommandos und Icons, sie wird daher auch *kommandobasierte* oder *WIMP-basierte Interaktion* genannt (WIMP: Windows, Icon, Menu, Pointing Device; vgl. Nielsen, 1993; Jacob et al., 2008). Die gleiche Aufgabe in einem immersiven VR-basierten CAD-System mittels physischer Model-

lierwerkzeuge zu lösen, könnte bedeuten, mittels eines drucksensitiven Stiftes die Modellieroperation zu starten (Ebenen 1-4) und die Werkzeuge in einer bestimmten Weise zu bewegen (Ebene 1: physisch). Die Interaktion basierte hier insbesondere auf physischer Manipulation, sie wird daher auch *nicht-kommandobasierte Interaktion* bzw. *direkte Manipulation* genannt (vgl. Nielsen, 1993; Shneiderman, 2002b).

Zwischen beiden Interaktionskonzepten bestehen wesentliche Unterschiede. Verglichen mit kommandobasierten textuellen oder kommandobasierten grafischen Benutzungsschnittstellen kennzeichnet direkt manipulative Benutzungsschnittstellen ein besonders breitbandiger Energieaustausch („Traffic") auf der untersten, physikalischen Ebene des semiotischen Interaktionsmodells. Die Syntax der Interaktion ergibt sich hier meist implizit durch die physische Kodierung der Schnittstelle; Shneiderman spricht sogar vom „Verschwinden der Syntax" (Shneiderman, 2002b, S. 89), da der Benutzer keine explizite Kommandosprache und -syntax erlernen muss. Aktion und Objekt, die sonst getrennt spezifiziert werden müssen, verschmelzen zu einem Interaktionstoken (vgl. Nielsen, 1993). Die Lösung des Interaktionsproblems verbraucht so vergleichsweise wenig kognitive Ressourcen. Oft erfolgt die physische Manipulation der Schnittstelle, da häufig wiederholt, unterhalb der Bewusstseinsschwelle. Nach Naumann et al. (2007; 2008) kann man in diesen Fällen von intuitiver Interaktion sprechen. Entsprechende Schnittstellen binden nur wenig Aufmerksamkeit des Benutzers auf den Gebrauch der Schnittstelle (dem Interaktionsproblem), womit vergleichsweise viele kognitive Ressourcen zur Lösung der Aufgaben (dem Gesamtproblem) zur Verfügung stehen (vgl. Mohs et al., 2007; Israel et al., 2009).

Während kommando- und sprachbasierte Schnittstellen eine sprachlich-bewusste Auseinandersetzung des Benutzers mit der zu lösenden Aufgabe erfordern, ist in direkt manipulativen Schnittstellen ein schrittweises, auf Probieren und Testen basierendes Lösen der Aufgabe möglich (vgl. Swendson, 1991). Spezifische Lösungsprozesse, für die, wie beispielsweise in den frühen konzeptionellen Phasen der Produktentwicklung, ein schrittweises Vorgehen kennzeichnend ist, erhalten durch direkt manipulative Schnittstellen besondere Unterstützung. Andererseits vermitteln kommandobasierte Schnittstellen ein größeres Bewusststein des eingeschlagenen Lösungswegs als direkt-manipulative Schnittstellen (vgl. Swendson, 1991). Ein hohes Lösungs- und Problembewusstsein kann jedoch, jedenfalls in der Domäne der Produktentwicklung, auch durch ein nachträgliches sprachliches Reflektieren erreicht werden (vgl. Wetzstein & Hacker, 2002).

Mit Blick auf die in Kapitel 2 und 3 dargestellten Problemlösestrategien können die meist kommandobasierten Schnittstellen bestehender CAD-Systeme und CAx-Werkzeuge dem bewusstem, sprachlichen Problemlösen zugeordnet werden. Diese Form des Problemlösens wird durch aktuelle CAx-Systeme mit umfangreichen Funktionalitäten abgedeckt. Dem intuitiven, meist nicht bewusstseinspflichtigen entwerfenden Problemlösen, dem auch das Skizzieren und skizzierendes Modellieren zuzurechnen sind, können dagegen erst wenige Systeme und Benutzungsschnittstellen entsprechen. Selbst die als direkt-manipulativ bezeichneten CAD-Systeme sind dazu nicht uneingeschränkt geeignet, da sie, um auf das bereits in der Einleitung (Abschnitt 1.1.3, S. 4) angeführte Zitat von Petruschat zurück zu kommen, die Interaktion des dreidimensionalen Modellierens in unverbundene Positionierungs- und Verschiebungskommandos aufbrechen: „Die Hände arbeiten nicht schwungvoll, sondern diskret: Sie lösen Befehle aus, die eine Maschine (Algorithmen) freigeben, Formen zu emulieren. Was beim Zeichnen eine rhythmische und selbstresonante

Bewegung ist, ist beim CAD ein Hin und Her, bei dem Handlungsschritte (Druck auf Tastatur, Maus, board oder pad) in den Takt der Rechenmaschine verkettet sind. Während das Zeichnen zirkuliert, (…) ist das Entwerfen am Computer ein Arbeiten im Führerstand: Befehlsausgabe und Begutachtung der Befehlsausführung." (Petruschat, 2001b, S. 70; vgl. auch Schkolne, 2006)

Es gilt also Interaktionstechniken zu entwickeln, die es dem Benutzer ermöglichen, seine Aufmerksamkeit auf die Lösung der Aufgabe und nicht auf die „Bedienung" der Schnittstelle zu richten, die also *intuitiv* benutzbar sind (vgl. Mohs et al., 2006a; Mohs et al., 2007; Naumann et al., 2007; Naumann et al., 2008). Dies kann jedoch nur gelingen, wenn die Bandbreiten sowohl der Benutzer-„Eingaben" als auch der System-„Ausgaben" ausreichend hoch sind, um flüssiges Interagieren zu ermöglichen.

Es lässt sich zusammenfassen:

- Kommandobasierte CAD-Systeme heben den Problemlöseprozess auf eine sprachliche, bewusste Ebene. Ihre Benutzung erfordert mehr Aufmerksamkeitsressourcen als die Interaktion mit direkt manipulativen Systemen.
- Bestehende CAD-Systeme eignen sich nur sehr eingeschränkt für intuitive, nicht bewusstseinspflichtige Lösungshandlungen. Hier sind neue Interaktionstechniken gesucht, die es dem Benutzer erlauben, seine Aufmerksamkeit auf die Aufgabe und nicht auf die Benutzung („Bedienung") der Schnittstelle zu richten.
- Solche Interaktionstechniken müssen flüssiges Interagieren ermöglichen und hohe Interaktionsbandbreiten sowohl für die Eingabe als auch für die Ausgabe zu Verfügung stellen.

Als zwei potenziell geeignete Interaktionstechnologien, die einerseits eine breitbandige Informationsausgabe und andererseits eine breitbandige Informationseingabe ermöglichen, werden in den kommenden Abschnitten die Technologien Virtual Reality und Tangible User Interfaces diskutiert.

4.3 Virtual Reality und 3D-User Interfaces

4.3.1 Dreidimensionale Darstellung von Datenräumen

Zu den ersten technologischen Visionen eines allumfassenden interaktiven Zugangs zu digitalen Datenräumen gehörte Ivan E. Sutherlands „Ultimatives Display" (Sutherland, 1965, S. 506). Dieses verstand er als „Spiegel in ein mathematisches Wunderland", in dem „Ideen und Konzepte, die bisher keine visuelle Repräsentation haben, gezeigt werden (...) und die wir so gut erlernen können, als wären sie in der natürlichen Welt." (ebd.) Durch den Umgang mit solchen Systemen könne umfassendes neues Wissen erwachsen, worin Sutherland „das größte Versprechen" dieser Technologien sah. Bereits Sutherland und einige seiner Vorgänger (vgl. u. a. Heilig, 1962) nann-

ten es als Ziel, die Simulation der künstlichen Umgebung nicht auf den visuellen Sinn zu beschränken, sondern möglichst vielen Sinnen „zu dienen“ (Sutherland, 1965, S. 506), also auch kinetische, olfaktorische, auditive u. a. Displays zu integrieren.

Während Sutherland noch von Räumen sprach, „in denen der Computer die Materie kontrolliert“ (ebd.) sehen spätere Visionen wie Ubiquitous Computing (vgl. Weiser, 1993) und Tangible User Interfaces (vgl. Fitzmaurice et al., 1995; Ishii & Ullmer, 1997) die Wirksamkeit digitaler Systeme insbesondere in der Verschränkung digitaler Informationen mit realen Arbeitsräumen. Weiser strebt dabei „allgegenwärtige“ und „transparente“ Schnittstellen an, in denen der Benutzer alle Aufmerksamkeit der inhaltlichen Lösung eines Problems und nicht der Funktionsweise der Computerschnittstelle widmen kann, beispielsweise für Arbeiten an Textdokumenten oder Recherchen. Die Wirkung von Tangible User Interfaces wird dagegen durch deren physischen, greifbaren Charakter bestimmt. Hier soll die Schnittstelle zwischen Realität und Virtualität nicht verschwinden, sondern sie wird zum zentralen Gegenstand der Produktgestaltung (Abschnitt 4.5, S. 93).

In dieser Arbeit wird der Begriff Virtual Reality (VR) nach Bowman et. al (2004), Burdea und Coiffet (1994) und Milgram und Kishino (1994) definiert. Letztere verstehen VR synonym zu Virtual Environment (VE, dt. virtuelle Umgebung) als „synthetische, räumliche (normalerweise 3D) Welt, die aus einer [egozentrischen] Erste-Person-Perspektive wahrgenommen wird. Der Blick in die VE wird vom Benutzer in Echtzeit kontrolliert.“ (Bowman et al., 2004, S. 7) Die grafische, häufig stereoskopische interaktive 3D-Darstellung digitaler Daten ist zweifellos das charakteristischste Kennzeichen von VR-Systemen. Burdea und Coiffet (1994) fassen den VR-Begriff jedoch weiter. Die von ihnen definierten traditionellen Säulen der VR, *Immersion, Interaktion* und *Imagination* (I^3) beschreiben den Anspruch, mittels visueller, akustischer und taktiler sensorischer Stimulationen und multimodaler Interaktionsmöglichkeiten eine Vorstellung (Imagination) des umfängliches Erlebens (Immersion) virtueller Umgebungen zu ermöglichen. Ursprünglich wurde Virtual Reality sehr dogmatisch mit vollständigem „Eintauchen“ (Immersion) in Verbindung gebracht. Von diesem Verständnis wird aufgrund fehlender Benutzerakzeptanz, ergonomischer Probleme und zum Teil hoher Kosten immersiver VR-Systeme in vielen Bereichen zunehmend zugunsten eines „Eingebettet-seins“ in integrierte physisch/virtuelle Arbeitsumgebungen Abstand genommen (vgl. u. a. Seichter & Kvan, 2004, S. 160; Bowman et al., 2004, S. 5). Der hohe Anspruch, nah an der beziehungsweise kompatibel zur physischen Realität zu sein, ist jedoch nach wie vor Ziel der Entwicklung von VR-Technologien.

Um zwischen verschiedenen Immersionsformen differenzieren zu können, führten Milgram und Kishino (1994) ein Kontinuum der Virtualität ein, an dessen Polen reale und virtuelle Umgebungen stehen (vgl. Abbildung 23). Milgram und Kishino unterscheiden Physikalität und Virtualität dahingehend, ob im System physische oder simulierte Objekte sichtbar sind, ob insbesondere die realen Objekte direkt sichtbar sind oder projiziert werden, und ob die Objekte am Ort der Lichtemission wahrgenommen werden oder eine räumliche Projektion erfolgt. Reale Umgebungen, in die virtuelle Objekte, beispielsweise mittels Projektion, eingebracht werden, lassen sich dem zufolge als (um digitale Informationen) angereicherte Realität (engl. *Augmented Reality, AR*) bezeichnen. Virtuelle Umgebungen, in die reale, physische Objekte eingebracht werden, bezeichnen Milgram und Kishino dagegen als (um physische Objekte) angereicherte Virtualität (engl. *Aug-*

mented Virtuality, AV). Die Übergänge zwischen den Polen sind fließend. Sobald sowohl physische als auch virtuelle Objekte in einer Umgebung zusammengebracht werden, sprechen Milgram und Kishino von gemischter Realität (engl. *Mixed Reality, MR*).

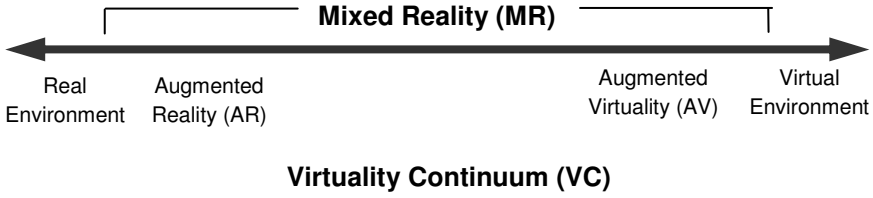


Abbildung 23: Kontinuum der Virtualität (aus Milgram & Kishino, 1994).

Für alle Abschnitte des Kontinuums existieren heute technologische Lösungen: nicht-immersive *Desktop-VR-Systeme* und *Augmented Reality (AR)*-Systeme unter Verwendung von optical- und video-see-through *Head Mounted Displays (HMDs)* sind typischerweise an der linken Seite des Kontinuums zu finden. Semi-immersive Systeme, beispielsweise *Holobench*-Systeme, sind in der Mitte des Kontinuums anzusiedeln, und immersive VR-Systeme, die großflächige Wandprojektionen einsetzen (z. B. VR-CAVE-Systeme), und immersive *HMDs* gehören an das rechte Ende des Kontinuums.

Die charakteristischen Eigenschaften der VR-Technologie in Abgrenzung zu anderen MMI-Konzepten können folgendermaßen zusammengefasst werden:

- ▷ Echtzeit-Interaktivität
- ▷ Räumliche, stereoskopische Darstellung virtueller Daten
- ▷ Integration mehrerer Sinnesmodalitäten
- ▷ Räumliche und semantische Integration physischer und realer Objekte

4.3.2 Technische Grundlagen

Die technische Umsetzung virtueller Umgebungen erfordert die Integration verschiedener Systembausteine und Technologien (vgl. Abbildung 24). Hierzu zählen im wesentlichen (vgl. u. a. Bowman et al., 2004; Bimber & Raskar, 2005):

- *Interaktive 3D-Grafik / Rendering:* Technologien zur Darstellung geometrischer Objekte in einer Qualität und Geschwindigkeit, die den Benutzern eine Interaktion mit dem VR-System in Echtzeit ermöglichen. Die geometrischen Projektionsmodelle stereoskopischer VR-Systeme definieren die geometrische Beziehung zwischen den registrierten (engl. *tracked*) Be-

nutzern B, ihren Augen B_R und B_L, einem Projektor P, sowie den virtuellen Objekten O_V, die an den Projektionspunkten mp auf die Projektions- bzw. Displayfläche D abgebildet werden (vgl. Abbildung 25). Die Transformation der 3D-Koordinaten auf die Projektionsfläche, sowie die Berechnung der Farb- und Beleuchtungswerte, Schatten und Oberflächentexturen erfolgt durch sogenannte Rendering Pipelines, die in Hard- oder Software realisiert werden können. Als plattformunabhängiger Industriestandard beschreibt die Grafikbibliothek OpenGL (vgl. Neider et al., 1993) ein Referenzverfahren zur Darstellung dreidimensionaler Szenen und eine entsprechende Programmierschnittstelle.

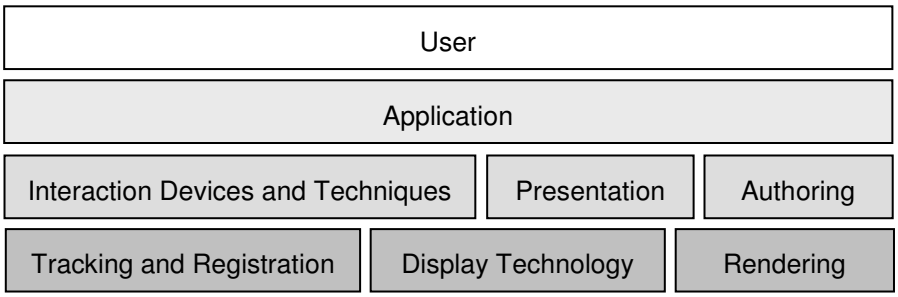


Abbildung 24: Bausteine eines VR-Systems (nach Bimber & Raskar, 2005, S. 6).

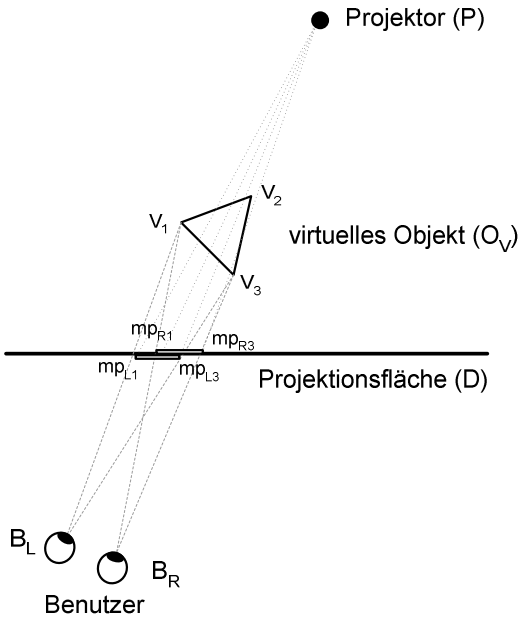


Abbildung 25: Geometrisches Projektionsmodell (Bimber & Raskar, 2005, S. 94).

- *3D-Displays:* Einrichtungen zur Projektion virtueller Umgebungen als stereoskopische Bilder in die Umgebung der Benutzer. Die Darstellung erfolgt in der Regel mittels Auf- oder Rückprojektionen, am Kopf getragenen Displays (sogenannter Head Mounted Displays, HMDs) oder herkömmlichen Computerdisplays. Stereoskopische Projektionsverfahren erfordern es, dass Benutzer Brillen tragen, um die projizierten Bilder für linkes und rechtes Auge zu separieren. Mittels autostereoskopischer Displays können Betrachter plastische Bilder dagegen ohne jegliche Sehhilfe wahrnehmen. Hier werden separate Lichtbündel direkt in die Augen der Betrachter projiziert, wofür in der Regel eine mechanische Nachführung des Projektionssystems bzw. von Linsenrastern erforderlich ist (vgl. Liu et al., 2000; Fehn et al., 2006).

  Zur Realisierung immersiver virtueller Umgebungen werden oft sogenannte CAVE-Systeme (CAVE Automatic Virtual Environment; vgl. Cruz-Neira et al., 1992) eingesetzt, die üblicher Weise aus drei bis sechs halbtransparenten Wänden bestehen, auf die virtuelle Szenen mittels Rückprojektion abgebildet werden. Die Benutzer können sich innerhalb der Installation frei bewegen und interagieren (Abbildung 26). Weitere verbreitete VR-Systemvarianten nutzen eine große Projektionsfläche (sogenannte Powerwalls) beziehungsweise Tischinstallationen mit ein oder zwei Projektionsflächen (sogenannte Workbench- und Holobench-Systeme).

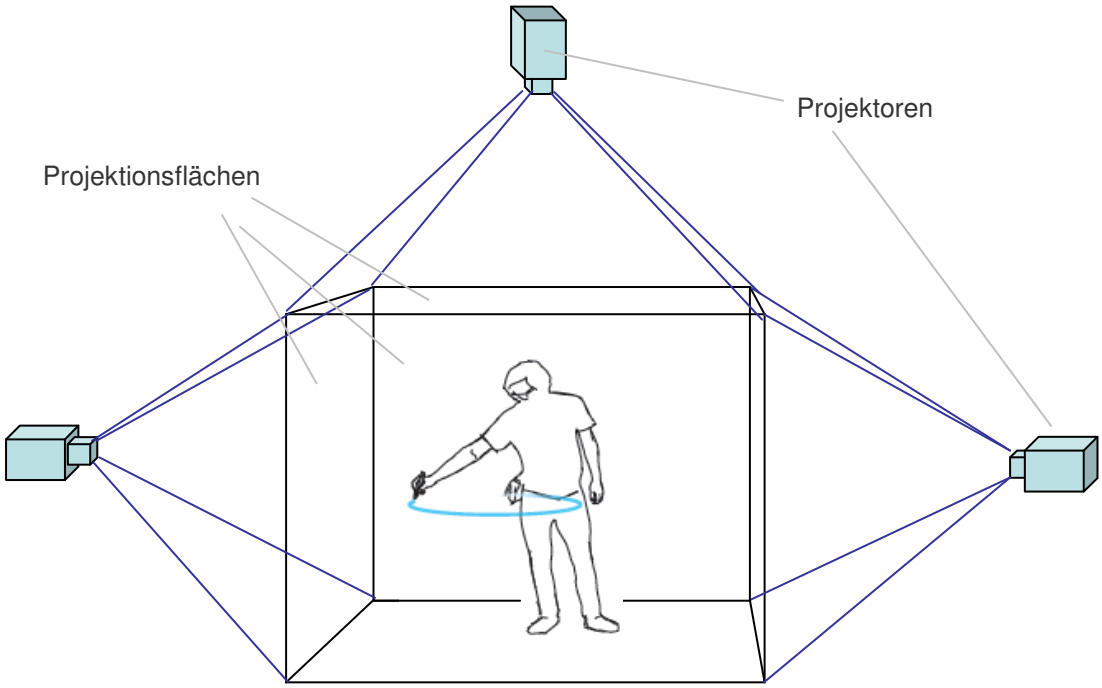


Abbildung 26: Symbolische Darstellung eines CAVE-Projektionssystems.

- *3D-Trackingverfahren:* Einrichtungen zur Erfassung der räumlichen Position und Orientierung der Benutzer sowie der verwendeten Interaktionsgeräte und -objekte. Trackingverfahren setzen u. a. magnetische, optische, mechanische, akustische Methoden ein und unterscheiden sich beispielsweise hinsichtlich ihrer räumlichen Genauigkeit, Auflösung, Stabilität, Form und

des Gewichts der Sensoren und der Anzahl der trackbaren Objekte und Kosten. Da mit optischen Systemen derzeit die genauesten und stabilsten Ergebnisse erzielt werden können, sind diese zur Standardlösung im industriellen Einsatz geworden.

- *3D-Interaktionstechniken und -geräte:* Physische Manipulationsmöglichkeiten der Benutzungsschnittstelle, die den Anwendern im VR-System zur Verfügung stehen, um ihre Aufgaben zu lösen (Abschnitt 4.3.3, S. 75).
- *3D-Visualisierung / Präsentation:* Methoden zur visuellen, in der Regel dreidimensionalen Aufbereitung digitaler Daten, um diese den Anwendern in verständlicher Form darzubieten. VR-Visualisierungen erlauben dem Benutzer, Informationen interaktiv zu untersuchen, und räumlich in diesen zu navigieren.
- *VR-Anwendungen:* Anwendungssysteme, die die spezifischen Möglichkeiten des virtuellen dreidimensionalen Raums zur Lösung von Aufgaben ausschöpfen. Die primären Anwendungsfelder von VR-Technologie sind bisher in den Bereichen Simulation und Training technischer Anlagen und Systeme sowie der Visualisierung wissenschaftlicher, konstruktiver und geschäftlicher Informationen zu finden (Bowman et al., 2004).

Die vorliegende Arbeit betrachtet Virtuelle Realität aus der Perspektive dreidimensionaler Interaktionstechniken im Kontext von VR-Anwendungen des dreidimensionalen Skizzierens.

4.3.3 3D-Interaktionstechniken, Aufgabendekomposition und Canonical Manipulation Tasks

Jacob definiert eine Interaktionstechnik als „einen Weg, ein physisches Eingabegerät zu benutzen, um in einem Mensch-Computer-Dialog eine bestimmte Aufgabe zu erfüllen“ (Jacob, 1990, S. 15; vgl. auch Myers, 1989, S. 16). Die Manipulationen am physischen Gerät werden mittels *Transferfunktionen* auf Operationen an digitalen Daten abgebildet, die in virtuellen Umgebungen häufig visuell und räumlich repräsentiert werden. VR-Interaktionstechniken variieren stark hinsichtlich der verwendeten Geräte und der zu lösenden Aufgaben. Um dennoch Untersuchungen der Gebrauchstauglichkeit auf dem Gebiet dreidimensionaler Benutzungsschnittstellen durchführen zu können und neue Interaktionstechniken zu entwickeln, werden üblicherweise basale Teilaufgaben betrachtet, aus denen sich komplexe Aufgaben zusammensetzen. Poupyrev et al. (1997) und Bowman et al. (2005) schlagen hierfür Interaktionstechniken der *Manipulation* virtueller Objekte, der *Navigation* in virtuellen Umgebungen und der *Systemkontrolle* von VR-Systemen vor. Aufbauend auf den arbeitswissenschaftlichen Untersuchungen von McCormick (1970) und Mundel (1978) definieren sie darüber hinaus die drei grundlegende Manipulationstechniken Selektion, Positionieren und Orientieren, so genannte *canonical manipulation tasks (CMT),* zur Lösung von Aufgaben in virtuellen Umgebungen. Zusammenfassend können folgende grundlegende Interaktionstechniken herkömmlicher VR-Systeme genannt werden. Da sie keine semantischen, aufgabenspezifische Teile der Interaktion beschreiben, sind sie den unteren Ebenen des semiotischen Interaktionsmodells (Abschnitt 4.2, S. 67), d. h. dem Interaktionsproblem (vgl. Streitz, 1986) zuzuordnen:

- *Manipulation*: Techniken zur Kontrolle extrinsischer Objekteigenschaften (Position, Orientierung), auch Canonical Manipulation Tasks (CMT):

  - *Selektion:* Techniken zur Auswahl zu manipulierender virtueller Objekte. In vielen VR-Systemen ist nach wie vor ein explizites Setzen des Interaktionsfokus nötig (time-multiplexed interaction, s. Kritik im Abschnitt 4.3.5, S. 78).
  - *Positionieren:* Kontrolle der Position virtueller Objekte.
  - *Orientieren:* Kontrolle der Orientierung virtueller Objekte.
- *Navigation:* Techniken zum Bestimmen des betrachteten Ausschnitts der virtuellen Umgebung und zum Verschieben der Betrachterposition im virtuellen Raum.
- *Systemkontrolle:* Techniken zur Steuerung der Parameter des VR-Systems.

Klassische VR-Interaktionstechniken (vgl. Abbildung 27) sind beispielsweise die Pointing Technik, mittels derer Benutzer Objekte über einen virtuellen Strahl selektieren und anschließend manipulieren können (z. B. Virtual Pointer, vgl. Bowman & Hodges, 1997); bzw. die Virtual Hand Technik, mittels derer die Handbewegungen des Benutzers auf ein digitales Handmodell abgebildet werden, womit Objekte selektiert und manipuliert werden können (z. B. Plain Virtual Hand, vgl. Poupyrev et al., 1996). Bei exozentrischen Interaktionstechniken (auch World-in-a-Miniature Techniken) blickt der Betrachter scheinbar von Außen auf die virtuelle Szene und manipuliert miniaturisierte Objektkopien (z. B. Voodoo Dolls, vgl. Pierce et al., 1999).

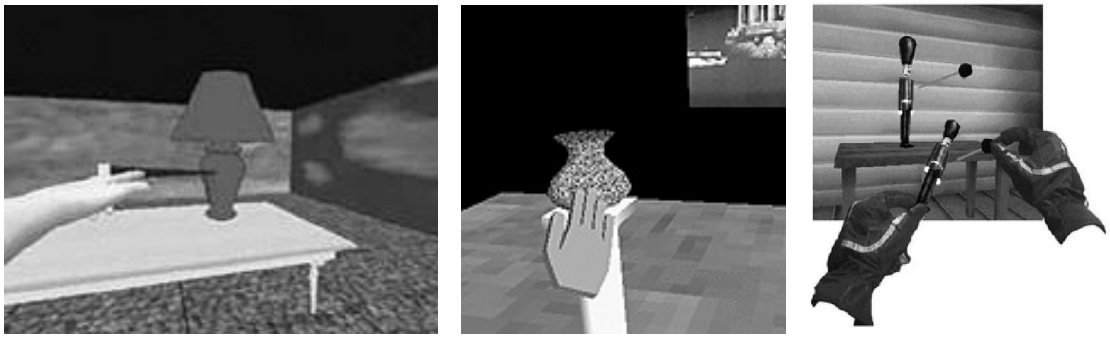


Abbildung 27: Klassische VR-Interaktionstechniken (v. l. n. r.): Virtual Pointer (vgl. Bowman & Hodges, 1997), Plain Virtual Hand (vgl. Poupyrev et al., 1996), VooDoo Dolls (vgl. Pierce et al., 1999).

Zusammenfassend kann festgehalten werden:

- ▷ Um generalisierbare Aussagen über VR-Interaktionstechniken treffen zu können, werden häufig Manipulationstechniken (Selektion, Orientierung, Positionierung), Navigationstechniken und Methoden zur Systemkontrolle separat untersucht.
- ▷ Viele VR-Interaktionstechniken erfordern ein explizites Setzen des Interaktionsfokus (Selektion). Sie sind darin 2D-WIMP Interaktionsmetaphern verwandt.

4.3.4 Haptische Interaktionstechniken

Greifen und direkte Manipulation von Objekten können bisher in Virtual Reality Umgebungen nicht realistisch simuliert werden. Mittels Datenhandschuhen, die die Position der Hand und ggf. der Finger bestimmen, ermöglichen jedoch viele Systeme, grafische Modelle der Hände oder andere haptische Cursor in die virtuelle Umgebung zu integrieren und somit die Greifbewegung zu planen. Sobald ein virtuelles Objekt berührt wird, geht der Bezug zum natürlichen Greifen jedoch verloren, da die verwendeten Interaktionsgeräte entweder gar kein haptisches Feedback geben oder zu unspezifisch sind, um objektcharakteristische Tasterlebnisse und Kraftwirkungen zu vermitteln. Auch griffbasierte Force-Feedback-Systeme erlauben es nicht, virtuelle Objekte direkt zu greifen, sondern ermöglichen deren Manipulation ausschließlich vermittelt über unspezifische Griffe.

Die Darstellung mechanischer Eigenschaften virtueller Objekte erfolgt mittels haptischer Displays, die vorwiegend auf die Abbildung von Kräften ausgerichtet sind (kinästhetische Displays, vgl. Abbildung 28). Praxistaugliche Displays zur Darstellung taktiler Informationen vermitteln derzeit nur Vibrationen, jedoch keine Berührungs- und Tasterlebnisse. Haptische Displays lassen sich grob unterscheiden im Hinblick auf die Positionierung zum Benutzer (körpergetragene oder ortsfeste Geräte) und deren Konstruktion (Stift/Griff-basierte und Exoskelett-basierte Geräte).

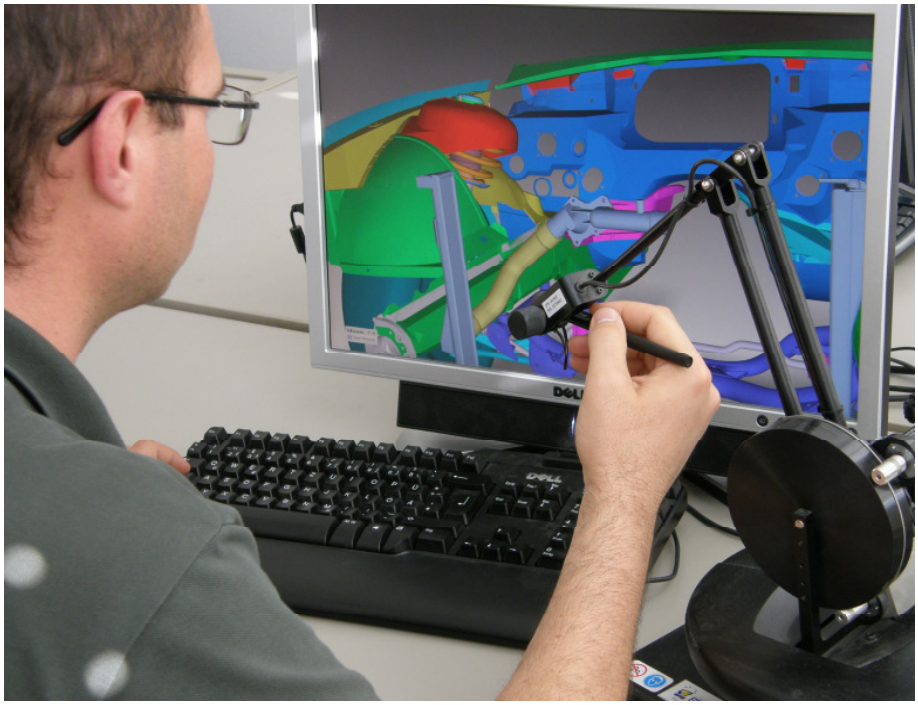


Abbildung 28: Beispiel eines Griff-basierten haptischen Displays.

Exoskelett-basierte haptische Displays können am Körper getragen oder mit ortsfesten Force-Feedback-Armen kombiniert werden (vgl. u. a. Immersion-Corp., 2005). Sie erfordern vom Benutzer, die Finger, das Handgelenk und/oder den Arm einzuspannen. Einige Geräte lassen sich

mit Datenhandschuhen kombinieren, die taktiles Feedback durch Vibration vermitteln. Der Vorgang des Anlegens und Kalibrierens solcher Geräte ist zeitaufwändig und ungeeignet für regelmäßige Arbeiten, sie finden daher meist nur in immersiven Simulationsanwendungen Einsatz. Die in der Regel ortsfesten Stift/Griff-basierten Geräte (vgl. u. a. SensAble-Technologies-Inc., 2005) können hingegen ad hoc benutzt werden und eignen sich für regelmäßige Arbeiten. Mittels eines am Force-Feedback-Arm angebrachten Stifts oder Griffs kann der Benutzer Objekte der virtuellen Szene *punktuell* abtasten und manipulieren, eine flächige Interaktion mit der Objektoberfläche ist jedoch nicht möglich. Beiden Ansätzen ist gemein, dass sie die mechanischen Objekteigenschaften auf das Interaktionsgerät übertragen und so die taktile und kinästhetische Wahrnehmung des Objekts auf die Auflösung und Genauigkeit des Interaktionsgeräts beschränkt bleibt. Objektspezifische Greifinteraktionen sind derzeit nur mittels an Hand und Fingern getragener Exoskelette bzw. Seilkonstruktionen (vgl. Walairacht et al., 2002) oder ortsfester Geräte möglich, die die Finger des Benutzers aufnehmen (vgl. Kurillo et al., 2005). Die aufwändige Abbildung der resultierenden Kräfte auf die Aktuatoren des Geräts verhindert in der Praxis jedoch realistisches und flüssiges Greifen, so dass die Finger teilweise in das zu greifende Objekt eintauchen und das Greifen trotz haptischen Feedbacks aufwändig visuell kontrolliert werden muss. Eine weitere typische Limitierung ist die Verzögerung von Rotationen um den Objektmittelpunkt durch die Trägheit des Exoskeletts. Die Praxistauglichkeit dieser Geräte insbesondere für Greifinteraktionen ist deshalb begrenzt.

Zusammenfassend kann festgehalten werden:

- Haptische Interaktionsgeräte erlauben punktuellen, abtastenden Zugriff auf die virtuelle Umgebung, jedoch keine flächige Interaktion mit virtuellen Objektoberflächen.
- Realistisches Greifen ist in heutigen VR-Systemen noch nicht möglich.

4.3.5 Kritik des immersiven VR-Konzepts

Im Kontext Mensch-Maschine-Interaktion kann das Konzept immersiver Virtueller Realität als dasjenige gelten, mit dem eine möglichst hohe Kompatibilität zum sensumotorischen Apparat des Benutzers bei gleichzeitiger Ausschöpfung algorithmischer Möglichkeiten des digitalen Systems (engl. *computational power*) angestrebt wird. Dass Sutherlands Vision eines „Spiegels in ein mathematisches Wunderland“ (Sutherland, 1965, S. 506) Realität werden kann, erscheint vor dem Hintergrund der Entwicklung der VR- und Computertechnologie daher nicht aussichtslos. Das immersive VR-Konzept birgt jedoch einige wesentliche *konzeptionelle* Schwächen, die in diesem Abschnitt diskutiert werden Bestehende Probleme der sensorischen und motorischen Integration, die sich auf die *physische* Ebene der Mensch-Maschine-Interaktion (Abschnitt 4.2, S. 67) beziehen, werden später insbesondere für die Bereiche visuelle Wahrnehmung und haptische Interaktion im Abschnitt 4.4, (S. 84) diskutiert. Die wichtige Diskussion der sozialen Konsequenzen eines zunehmenden Einsatzes virtueller Technologien kann hier dagegen nicht geführt werden (vgl. hierzu u. a. Weizenbaum, 2001).

Im Hinblick auf immersive VR-Systeme bestehen mehrere konzeptionelle Probleme, die den syntaktischen und semantischen Ebenen des semiotischen Interaktionsmodells (Abschnitt 4.2, S. 67) zuzurechnen sind; dazu zählen insbesondere:

- Time-multiplexed Interaktion, WIMP-basierte Interaktion
- Gerätezentrierter statt objektzentrierter Ansatz
- Ergonomische Probleme
- Eingeschränkte Integration in den Arbeitsraum des Benutzers

4.3.5.1 Time-Multiplexed Interaktion, WIMP-basierte Interaktion

In ähnlicher Weise wie 2D-GUI-Anwendungen basiert auch die Interaktionssyntax in VR-Systemen häufig auf einem „point & click" bzw. WIMP-Konzept, in dem der Benutzer mittels Zeigegeräten interagiert und die *Auswahl* eines Objekts von dessen *Manipulation* konzeptionell getrennt ist (WIMP: windows, icons, menus, and pointing devices; Nielsen, 1993). Flüssige Interaktion wird durch diese Art der Interaktion erschwert (vgl. u. a. Nielsen, 1993; Petruschat, 2001b; Sachse, 2002; Jacob et al., 2008).

Um in WIMP ähnlichen VR-Systemen mit einem Objekt zu interagieren, muss der Benutzer zunächst mittels einer Selektionshandlung ein Objekt auswählen, wodurch der Benutzer dem System den Fokus seiner Aufmerksamkeit explizit kommuniziert. Dies geschieht in VR-Systemen häufig durch Zeigegeräte (beispielsweise sogenannte Flightsticks), die einen Selektionsstrahl steuern (ray-based selection, vgl. Abbildung 27 und Abbildung 29). Für die Selektion ist typischerweise ein zeitlicher Aufwand nötig (engl. *acquisition time*, Abbildung 30). Nachdem der Benutzer ein Objekt selektiert hat, kann er dieses manipulieren (beispielsweise rotieren lassen, verschieben oder verformen) und abschließend den Interaktionsfokus wieder vom Objekt lösen. Diese Interaktionssyntax wird in VR-Systemen durch die im Abschnitt 4.3.3 (S. 75) vorgestellten canonical manipulation tasks CMT realisiert (vgl. Bowman et al., 2004).

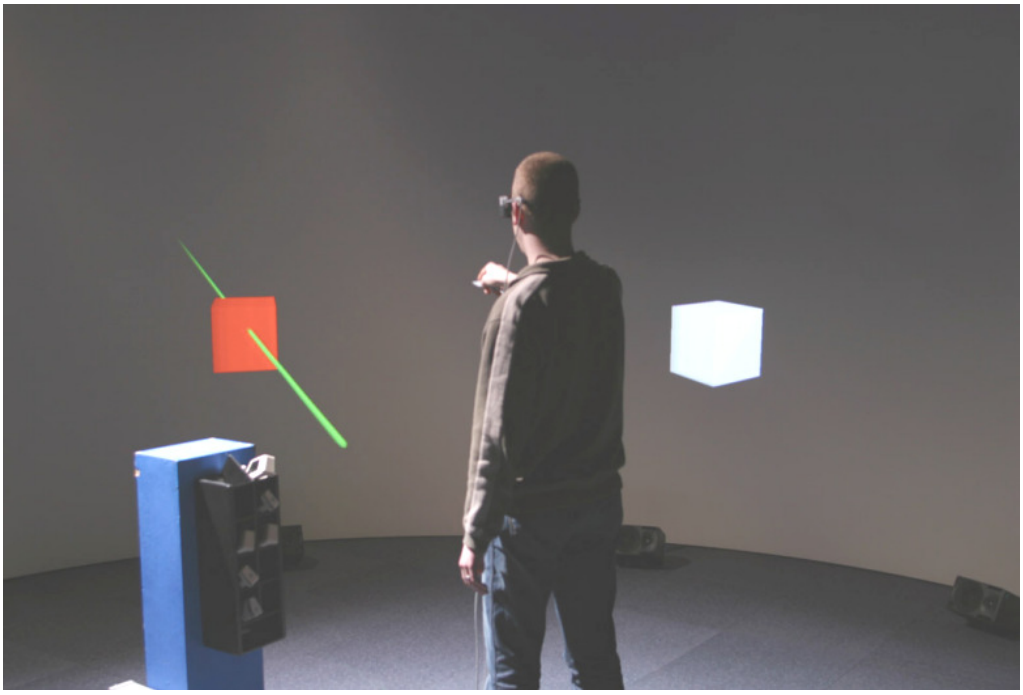


Abbildung 29: Zeigerbasierter (engl. *ray-based*) VR-Selektionstechnik (aus Simon, 2005).

Nielsen (1993), Buxton (1994) u. a. verweisen darauf, dass Interaktionstechniken, die ein physisches Interaktionsgerät zeitlich auf die Interaktion mit mehreren virtuellen Objekten verteilen (engl. *time-multiplexed interaction*), einerseits paralleles Arbeiten an mehreren Objekten (bzw. Aufgaben) erschweren und andererseits quasi ein sequentielles Interagieren erzwingen. Der mit der Selektion in Zusammenhang stehende zeitliche Aufwand (acquisition time) ist darüber hinaus einzig dem Interaktionsproblem zuzurechnen und verzögert somit die Lösung des Sachproblems. Die fortwährenden Selektionshandlungen „können außerdem den Arbeitsfluss des Benutzers und seine Gedanken unterbrechen“ (Buxton, 1994, S. 104). Petruschat spricht in diesem Zusammenhang pointiert von einem „Hin und Her, bei dem Handlungsschritte (...) in den Takt der Rechenmaschine verkettet [werden]“ (Petruschat, 2001b, S. 70). Nielsen (1993) hebt hervor, dass zukünftige Benutzungsschnittstellen Selektion und Manipulation als ineinander verschränkte Interaktionstoken realisieren und somit dem natürlichen menschlichen Greif- und Manipulationsverhalten wesentlich besser entsprechen sollten (Abschnitt 4.1.2, S. 64). Buxton und Fitzmaurice (1994; 1996; 1997) schlagen weiterhin vor, in Benutzungsschnittstellen mehrere physische Zugriffspunkte zu realisieren, die ein quasi paralleles, insbesondere beidhändiges Interagieren ermöglichen, keine explizite Kommunikation des Interaktionsfokus erfordern und somit die Aufmerksamkeit nicht von der Lösung der Aufgabe (dem Sachproblem) auf die Steuerung der Interaktionsschnittstelle (dem Interaktionsproblem) ablenken (vgl. Abbildung 31).

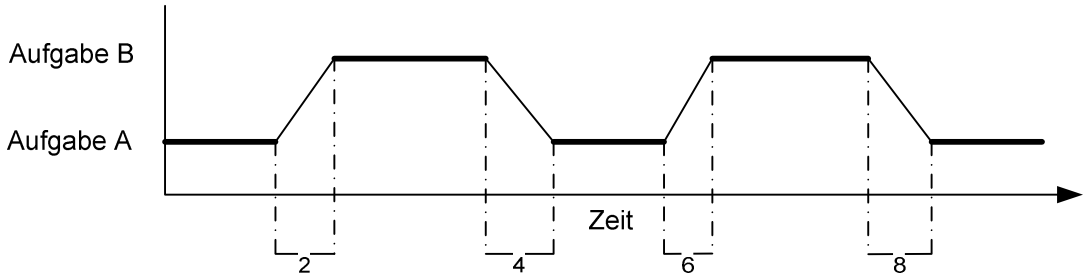


Abbildung 30: Time multiplexed interaction: Der Anwender muss dem System den Interaktionsfokus explizit kommunizieren (Selektionshandlungen (acquisition time) in den Abschnitten 2, 4, 6, 8; nach Buxton, 1994, S. 103).

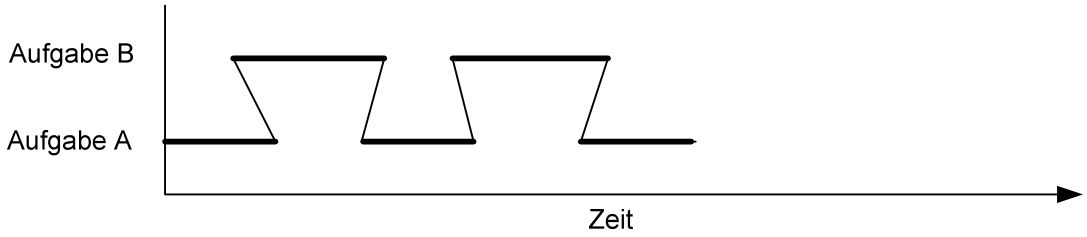


Abbildung 31: Space multiplexed interaction: Dem Anwender stehen mehrere räumlich verteilte Zugriffspunkte zur Verfügung, Aufgaben können z. T. parallel ausgeführt werden, die Gesamtbearbeitungszeit kann sich verkürzen (nach Buxton, 1994, S. 104).

Da mit bestehender VR-Interaktionshardware wie Datenhandschuhen und Exoskeletten bisher keine flüssigen Greif- und Manipulationsinteraktionen in virtuellen Umgebungen durchgeführt werden können, werden zunehmend Interaktionstechniken diskutiert, die physische Objekte wie die in Abschnitt 4.3.5.2 (S. 93) beschriebenen Props in den VR-Interaktionsraum einbringen. Einen entsprechenden Lösungsansatz stellen sogenannte fühlbare Schnittstellen (engl. *Tangible User Interfaces, TUI*) dar, die in Abschnitt 4.5 (S. 96) vorgestellt werden.

▷ Räumlich verteilte (engl. *space multiplexed*) Benutzungsschnittstellen könnten die Gebrauchstauglichkeit (Effizienz, Effektivität und Benutzerzufriedenheit, engl. *usability*) von VR-Interaktionstechniken wesentlich steigern.

4.3.5.2 Gerätezentrierter statt objektzentrierter Ansatz

Um in VR-Systemen virtuelle Objekte zu manipulieren, müssen diese zuvor an ein Interaktionsgerät, beispielsweise durch „Anklicken“, angeknüpft werden (attach, detach, vgl. Ullmer et al.,

2005). Interaktionsgeräte sind in der Regel unspezifisch geformt (beispielsweise Flightstick, Computermaus; Abschnitt 4.3.3, S. 75), die zu manipulierenden virtuelle Objekte haben jedoch häufig anwendungsspezifische Formen, es entsteht eine Inkongruenz zwischen der Form des physischen Interaktionsgeräts und des kontrollierten virtuellen Objekts, wodurch objektspezifische physische Manipulationen erschwert werden.

Während die Interaktion mit physischen Objekten verschiedene Bereiche insbesondere der Hand physisch stimuliert und so wichtiges haptisches Feedback über den Verlauf des Interaktion liefert, können mit unspezifischen haptischen Interaktionsgeräten, beispielsweise mit Stift-basierten Force-Feedback-Geräten (vgl. Abbildung 28), Objekte häufig nur in punktuell abtastender Weise erfasst werden. Diese sequentielle Art der Objektexploration ist zeitlich aufwändiger als das flächige Ertasten der Objektoberfläche mit der ganzen Hand. Die über die Objektform kodierten Affordances virtueller Objekte lassen sich daher häufig nur visuell, jedoch kaum haptisch erfassen. Lok (2004) sieht darin ein wesentliches Hindernis für den produktiven Einsatz von VR-Systemen begründet: „typische VR-Anwendungsfelder wie die Konstruktion von Baugruppen und deren Instandhaltung sind praktische [engl. hands-on] Aufgaben“ (Lok, 2004, S. 50). Das grundsätzliche Problem des eingeschränkten „fühlbaren“ Zugriffs auf diese Werkzeuge ist nach Lok eine „ernsthafte“ Einschränkung in der Anwendbarkeit von VR-Applikationen. „Einen Joystick mit sechs räumlichen Freiheitsgraden einzusetzen um einen Schraubenschlüssel zu simulieren, ist weit entfernt von der [physischen] Realität, möglicherweise zu weit um nützlich zu sein.“ (ebd.)

Ein Ansatz, realistische Greif- und Manipulationsinteraktionen zu ermöglichen, stellen sogenannte *Passive Haptic Devices (Props)* dar. Dies sind reale, physische Objekte, die in den Interaktionsraum integriert werden (vgl. Hinckley et al., 1994a; Insko, 2001; Krause et al., 2005). Diese Objekte können spezifische Formen und Oberflächentexturen aufweisen und ein passives, objektspezifisches Berührungsfeedback (engl. *touch feedback*) vermitteln. Props sind rein passive, physische Objekte, die in virtuelle Umgebungen integriert werden, um Kräfte und Oberflächen der korrespondierenden virtuellen Umgebung zu simulieren. Beispiele sind Lenkräder, Stufen und Möbelstücke (vgl. Insko, 2001). Ein erheblicher Nachteil von Props wie auch von Tangible User Interfaces (Abschnitt 4.5, S. 93) ist, dass ihre Einsatzmöglichkeiten, aufgrund der Spezifität der verwendeten physischen Objekte, meist auf wenige Anwendungen und Einsatzgebiete begrenzt sind (vgl. Sharlin et al., 2004).

Ein in der Anwendung flexibles kraftreflektierendes Interaktionsgerät für Greifinteraktionen und direkte Objektmanipulationen wurde von Krause et al. (2005) vorgestellt (vgl. Abbildung 32). Die Grundkomponenten des Systems bilden zwei Leichtbau-Force-Feedback-Arme (Aktuatoren), die als Eingabebremsen fungieren, zwischen denen unter Gebrauch von Formfaktoren verschiedene auswechselbare, greifbare Objekte (Endeffektoren, Props) eingespannt werden können. Durch die einfache Austauschbarkeit der physischen Objekte kann eine höhere Flexibilität der greifbaren Objekte erreicht werden. Es bestehen jedoch Beschränkungen hinsichtlich der Anzahl der gleichzeitig nutzbaren physischen Objekte, der physischen Zugriffspunkte und der visuellen Überdeckungen (engl. *occlusion*, Abschnitt 4.4.4, S. 88).

- ▷ Haptische Interaktionstechniken ermöglichen häufig nur einen punktuellen, abtastenden Zugriff auf virtuelle Objekte, der für viele Anwendungsfelder nicht ausreichend ist.
- ▷ Passive Haptische Displays (Props) können realistisches Berührungsfeedback (engl. *touch-feedback*) vermitteln, sind aber häufig auf einige sehr spezifische Anwendungen beschränkt.

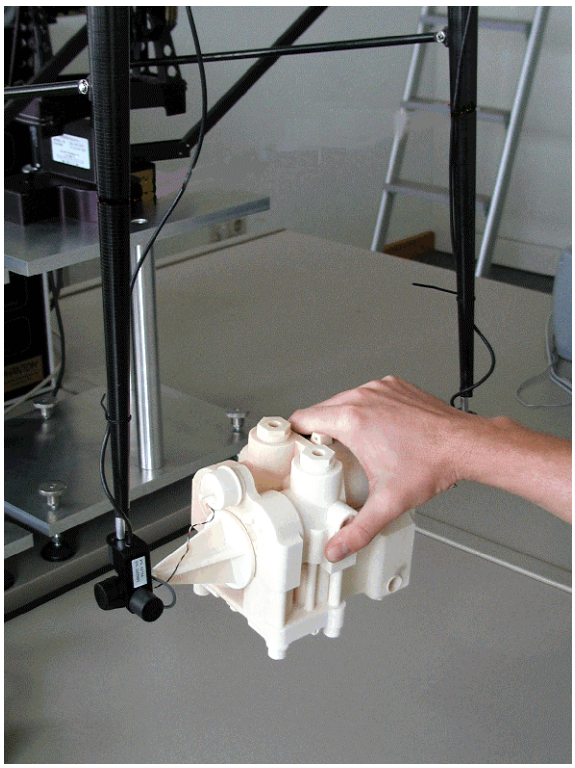


Abbildung 32: Zwei gekoppelte 3-DOF-Aktuatoren und ein physisches Objekt (Prop, Endeffektor, aus Krause et al., 2005, S. 110).

4.3.5.3 Ergonomische Probleme

Verschiedene ergonomische Probleme erschweren nach wie vor den Einsatz immersiver VR-Systeme, hierzu zählen insbesondere das hohe Gewicht am Kopf getragener Anzeigen (HMDs) und am Boden verlaufende Kabel für Tracking- und Visualisierungsgeräte, die Stolpergefahren darstellen können (vgl. Bowman et al., 2004). Das Gewicht moderner Head Mounted Displays nimmt jedoch immer weiter ab, einige Systeme, die allerdings in Blickfeld und Auflösung eingeschränkt sind, wiegen nur ca. 100 bis 300 Gramm (vgl. Azuma et al., 2001).

Erschwerend wirkt, dass sich bei einigen Benutzern von VR-Systemen Übelkeit, Schwindelgefühle oder Ermüdung einstellen. Diese auch als „Cybersickness“ beschriebenen Phänomene werden auf sensorische Konflikte zwischen dem visuellen und dem Stellungssinn zurückgeführt, die sich besonders bei hohen Latenzzeiten des VR-Systems einstellen (vgl. LaViola, 2000). Trotz wesentlicher technischer Fortschritte in den Bereichen Visualisierung und Tracking können auch mit

modernen Systemen nach 30 bis 45 Minuten VR-Einsatz bei Benutzern Symptome der Cybersickness auftreten. Da die Sensibilität für dieses Phänomen individuell verschieden ist und stark schwankt, lassen sich im Voraus keine allgemeingültigen Vorhersagen über die ergonomischen Probleme von VR-Systemen treffen.

Ein weiteres Hindernis für den industriellen Einsatz von VR-Technologie ist deren zum großen Teil fehlende ergonomische Zertifizierung. So liegen derzeit beispielsweise noch keine Aussagen über mögliche gesundheitliche Langzeitfolgen durch kopfgetragene Displays vor (vgl. Laramee & Ware, 2002; Brau et al., 2005).

4.3.5.4 Eingeschränkte Integration in die Arbeitsumgebung des Benutzers

Immersive VR-Systeme sind per Definition nicht nahtlos in die physische Arbeitsumgebung des Benutzers integriert, wodurch die Schwelle für den Einsatz dieser Systeme erhöht wird. Beispielsweise ist der Aufwand für das Anlegen eines Head Mounted Display bzw. eines Datenhandschuhs oder des Betretens und Verlassens einer VR-CAVE vergleichsweise hoch, so dass diese noch nicht nahtlos in herkömmliche Arbeitsabläufe integriert werden können. Weiterhin bestehen in immersiven VR-Umgebungen aufgrund der meist fehlenden Mehrbenutzertauglichkeit keine oder nur eingeschränkte Möglichkeiten zur Teamarbeit. Dazu trägt auch das Fehlen *deiktischer Referenzialität* bei, d. h. Zeigegesten können von anderen Benutzern eines immersiven VR-Systems räumlich nicht korrekt zugeordnet werden (vgl. Schmauks, 1991). Schließlich stehen in immersiven VR-Systemen auch die physischen und größtenteils auch die digitalen Arbeitsmittel nicht zur Verfügung; es entstehen physische und digitale Medienbrüche.

▷ Ergonomische Gründe, fehlende Mehrbenutzerfähigkeit und Hindernisse bei der Integration in persönliche Arbeitsumgebungen behindern derzeit noch die Verbreitung von VR-Systemen in industriellen Anwendungen.

4.4 Technische und wahrnehmungsbezogene Determinanten der Mensch-Maschine-Interaktion in immersiven Systemen

Im vorangegangenen Abschnitt wurden Eigenschaften von VR-Systemen dargestellt, die den semantischen, syntaktischen und lexikalischen Ebenen des semiotischen Interaktionsmodells zuzurechnen sind. In diesem Abschnitt wird nun insbesondere der Informationsaustausch auf der untersten, physikalischen Ebene dargestellt. Dabei liegt der Schwerpunkt auf der Diskussion *zeitlicher, räumlicher* und *modaler* Störgrößen und des Rauschens. Diese beeinflussen die Darstellung von Information durch das technische System und deren Wahrnehmung über den sensorischen Apparat des Benutzers. Zeitliche Störgrößen werden beispielsweise durch Verzögerungen der Darstellung oder niedrige Bildwiederholraten verursacht, räumliche Störgrößen beispielsweise durch einen wahrnehmbaren räumlichen Versatz zwischen virtueller und realer Umgebung und modale Störgrößen beispielsweise durch fehlendes haptisches Feedback virtueller Objekte.

Zusammenhänge aus Parametern der Aufgabe und des technischen Systems auf die Benutzerleistung in virtuellen Umgebungen können einerseits anhand sogenannter prädikative Modelle erfolgen (bottom-up Vorgehen; vgl. Anhang 12.3, S. 279 und 12.4, S. 280). Mittels dieser Modelle sind jedoch bisher erst wenige Aspekte der Interaktion im virtuellen Raum beschreibbar. Im Folgenen werden daher diejenigen Faktoren dargestellt, die besonderen Einfluss auf das Benutzerverhalten in immersiven Umgebungen haben (deskriptive Darstellung, top-down Vorgehen). Die daraus hergeleiteten Erkenntnisse fließen in die Gestaltungsanforderungen und Forschungsfragen für VR-Interaktionstechniken ein (Kapitel 6).

4.4.1 Technische Störgrößen der Mensch-Maschine-Interaktion in immersiven Umgebungen

Bei der Wahrnehmung natürlicher Szenen leitet das menschliche visuelle System Größen- und Tiefeninformation aus einer Vielzahl von visuellen Tiefenhinweisen ab (engl. *depth cues*, Abschnitt 4.1.1, S. 60). Diese Tiefenhinweise stimmen bei der Wahrnehmung natürlicher Szenen allesamt miteinander überein, da sie von realen Objekten alle am gleichen Ort generiert werden, so dass eine korrekte Tiefenwahrnehmung möglich ist. In stereoskopischen Mixed Reality-Systemen werden diese Tiefeninformationen entweder künstlich erzeugt, fehlen gänzlich oder sind der Steuerbarkeit durch das System entzogen. Daher kann es zur Verzerrung bis hin zum völligen Verlust der wahrnehmbaren Tiefeninformationen virtueller Szenen kommen (vgl. Drascic & Milgram, 1996). Dass die Störung oder der Verlust der Tiefenwahrnehmung zur Beeinträchtigung der Benutzerperformance und des Benutzererlebens führt, ist eine empirisch fundierte Grundannahme der VR-Forschung und bedingt technische Weiterentwicklungen.

Technische Faktoren und Störgrößen mit umfangreichen Auswirkungen auf die visuelle Wahrnehmung und Benutzerperformance wurden unter anderem von Drascic und Milgram (1996; 1997), Bowman, Kruijff et al. (2004), Azuma, Baillot et al. (2001) und Bimber und Raskar (2005) zusammengestellt. Die folgende Aufzählung orientiert sich an der Aufteilung von Drasic und Milgram (1996) in *Anwendungsfehler (engl. implementation errors), technologische Beschränkungen (engl. current technological limitations)* und *schwerwiegende Probleme (engl. the hard problems)*. Diese Aufzählung der Probleme der Virtual Reality Technik soll insbesondere aufzeigen, wodurch der Forschungs- und Entwicklungsbedarf im Bereich Virtual, Mixed und Augmented Virtuality aus ergonomischer Sicht zu begründen ist, um später Anforderungen an kreativitätsunterstützende VR-Interaktionstechniken und mögliche Lösungen aufzeigen zu können. Sie beinhaltet jedoch, im Unterschied zu deskriptiven Modellen (Anhang 12.4, S. 280), keine Quantifizierung der Probleme, ebenso konzentriert sie sich nicht auf besondere Geräteklassen.

Da das Forschungsfeld der immersiven VR seit dem Aufkommen der Mixed Reality Konzepte (vgl. Milgram & Kishino, 1994) eine Wandlung hin zu integrierten physisch/virtuellen Umgebungen erfährt (Abschnitt 4.5, S. 93), wurden für viele der von Drasic und Milgram (1996) genannten „schwerwiegenden Probleme“ bereits Einzellösungen entwickelt, auf die an den entsprechenden Stellen hingewiesen wird. Viele der hier genannten Probleme der Mensch-Maschine-Interaktion in immersiven Umgebungen treten bei der Interaktion mit realen, physischen Objekten nicht auf und können gerade durch den vermehrten Einsatz physischer Objekte gemindert werden (Abschnitt 4.5, S. 93).

4.4.2 Anwendungsfehler

Kalibrierungsfehler, Versatz der Kalibrierung (engl. calibration errors, calibration mismatch): Um stereoskopische dreidimensionale Bilder in den richtigen Proportionen darstellen zu können, müssen die Parameter des geometrischen Projektionsmodells bekannt sein (Abschnitt 4.3.2, S. 72), insbesondere der Augenabstand des Betrachters, sein Blickwinkel, sowie der Abstand vom Bild und die Betrachterperspektive. Die betrachterbezogenen Daten werden in der Regel mittels magnetischem oder optischem Tracking ermittelt. Da eine manuelle Vermessung und Angleichung der Bezugssysteme der Anzeige, des Trackingsystems und vor allem der Augenpositionen des Benutzers schwer zu realisieren sind, werden dafür in der Regel rechnergestützte Verfahren eingesetzt. Beispielsweise werden bei optischen Trackingverfahren allen Kameras Musterobjekte vorgelegt, um deren Koordinatensysteme ineinander transformieren zu können. Magnetische Trackingverfahren benutzen häufig Transformationsmatrizen, um die Koordinatensysteme des Trackings und der Darstellung abzugleichen.

Der menschliche visuelle Apparat kann sich fehlerhaft kalibrierten Systemen in bestimmten Grenzen gut anpassen. Wechselt die visuelle Aufmerksamkeit des Benutzers in fehlerhaft kalibrierten Systemen jedoch häufig zwischen virtuellen und realen Objekten, kann dies Orientierungsverlust und Performancedefizite verursachen (vgl. Milgram & Drascic, 1997).

Fehlerhafte Angabe des Augenabstands (engl. interpupillary distance mismatches, IPD): Die Angabe des Augenabstands hat für die korrekte Abbildung in stereoskopischen VR-Systemen ein große, oft unterschätzte Bedeutung. Kleine Abweichungen können zu großen Fehlern führen. Nimmt das System beispielsweise einen Augenabstand von 65 mm an, obwohl der Augenabstand des Benutzers 61 mm beträgt, erscheint ein Objekt, das 10,4 m vom Benutzer angezeigt werden sollte, tatsächlich in 48,8 m Entfernung, was einem Fehler von 369 % entspricht. Der Fehler kann sich darüber hinaus in den verschiedenen Achsen unterschiedlich stark auswirken und zu erheblichen Darstellungsverzerrungen führen (vgl. Drascic & Milgram, 1996).

4.4.3 Technologische Beschränkungen

Verzögerung, Bildwiederholrate (engl. lag, system update rate): Verzögerung und Bildwiederholrate sind zentrale Determinanten der Benutzerperformance im dreidimensionalen Raum (vgl. Anhang 12.4, S. 280).

Die technischen Komponenten eines VR-Systems (vgl. Abbildung 24), insbesondere die Komponenten des Benutzer- und Objekttrackings, der applikationsspezifischen Funktionen und der Darstellung (Rendering) benötigen Rechenzeit. Das kann sich auf die Geschwindigkeit und Wiederholrate, mit der das Gesamtsystem Einzelbilder erzeugt, auswirken. Die vom System generierten Bilder und gegebenenfalls weitere generierte multimodale Systemantworten sind zum Zeitpunkt der Darstellung veraltet, da sich die Umgebung seit dem Zeitpunkt der Messung verändert hat. Die Auswirkungen sind umso größer, je schneller sich die Objekte bewegen. Systemreaktionszeiten von über 30 bis 50 ms können bereits einen verzögernden Einfluss auf die Koordinierung der Hand haben (vgl. Levitin et al., 2000), bei Systemreaktionszeiten von über 225 ms beginnen Benutzer, ihre Bewegung nur noch asynchron mit dem Ergebnis abzugleichen (vgl. Cunningham et al., 2001).

Möglichkeiten, die Verzögerung zu verringern, bestehen einerseits im Einsatz leistungsfähiger Hardware, andererseits durch Prädiktionsalgorithmen, die den Zeitpunkt von Benutzer- und Objektpositionen zum tatsächlichen Darstellungszeitpunkt mittels historischer Daten prädizieren (vgl. Welch & Bishop, 1997; Rasmussen et al., 2006).

Räumliche Auflösung und Bildschärfe (engl. spatial resolution): Die räumliche Auflösung (räumliche Frequenz) projizierter virtueller Objekte ist an die (meist in Pixel bemessene) physische Auflösung der Anzeige gebunden und dadurch stets geringer als die von direkt betrachteten, realen Objekten. Damit ist verbunden, dass virtuelle Objekte undeutlicher erscheinen, ihre Lage ungenauer zu bestimmen ist und sie weniger Texturdetails aufweisen als vergleichbare reale Objekte. Diese Effekte bewirken, dass virtuelle Objekte als weiter entfernt wahrgenommen werden als reale Objekte, selbst wenn es keine Disparitätsunterschiede zwischen ihnen gibt (vgl. Drascic & Milgram, 1996; Ryu et al., 2005; Laramee & Ware, 2002).

Helligkeit und Kontrast (engl. mismatches of luminance and contrast): Die mit VR-Projektionstechniken erreichbaren Kontraste, d. h. Helligkeitsunterschiede zwischen zwei benachbarten Punkten, liegen weit unter denen physischer Objekte im Tageslicht. Geringe Kontraste können, insbesondere dann, wenn auch physische Objekte Teil der virtuellen Szene sind, virtuelle Objekte weiter entfernt erscheinen lassen, als es ihrer zugewiesenen Position entspricht.

Größe des Blickfeldes (engl. restricted field of view): Ein großes Blickfeld ist Voraussetzung für die Wahrnehmung der Umwelt, der darin enthaltenen Objekte und ihrer räumlichen Relationen. Einfache Handlungen, wie beispielsweise das Umqueren einer Wandvorsprungs, können durch unnatürlich beengte Blickfelder erschwert werden, die beispielsweise beim Einsatz von Desktop-VR-Systemen oder HMDs auftreten können.

Versatz der Bezugssysteme (engl. registration mismatches): Um die in Abschnitt 4.1.3 (S. 66) beschriebene multisensorische Integration, beispielsweise zur Koordination von Auge und Hand, optimal zu unterstützen, sollten zwischen dem realen Raum, in dem sich der Benutzer bewegt (*Bewegungsraum*), und dem Raum, in dem er die Auswirkungen seiner Handlungen wahrnehmen kann (*Wahrnehmungsraum*) idealer Weise kein räumlich-zeitlicher Versatz wahrnehmbar sein (vgl. u. a. Arsenault & Ware, 2000; Serefoglou et al., 2005).

Selbst in ideal kalibrierten Systemen kann die passgenaue Abstimmung zwischen realer und virtueller Umgebung jedoch nicht permanent aufrecht erhalten werden, so dass Bewegungen in der realen Umgebung asynchron zur virtuellen Umgebung verlaufen. Zum einen kann insbesondere bei optischen Verfahren das zu trackende Objekt (beispielsweise ein Interaktionsgerät oder ein Positionssensor am Kopf des Benutzers) vorübergehend verdeckt werden, so dass seine Position nicht mehr bestimmt und die virtuelle Szene nicht entsprechend aktualisiert werden kann.

Zum anderen treten bei allen Trackingmethoden verfahrensbedingt Störungen der ermittelten Positionen und Orientierungen auf, wenn sich der Benutzer im Raum bewegt. Diese bewirken ebenfalls einen räumlichen Versatz zwischen realer und virtueller Umgebung.

Schließlich ist selbst mit den schnellsten Tracking- und Darstellungsverfahren das visuelle Feedback der virtuellen Szene stets langsamer als das der realen Umgebung (beispielsweise bei schnel-

len Kopfbewegungen), so dass gezwungenermaßen ein räumlich-zeitlicher Versatz zwischen beiden Umgebungen entsteht.

Übersprechen (engl. crosstalk): Stereoskopische Anzeigen projizieren jeweils verschiedene Bilder in die Augen des Benutzers. Wenn diese Trennung nicht vollständig realisiert ist, sind in beiden Augen auch Anteile der für das jeweils andere Auge erstellten Bilder sichtbar. Dieses Phänomen wird als Übersprechen bezeichnet und verursacht Bildunschärfe (engl. *blurring*) und Doppelbilder (*ghosting*). Sehr starkes Übersprechen kann darüber hinaus das empfundene Verschmelzen der Bilder des linken und rechten Auges zu einer räumlichen Szene erschweren (vgl. Woods & Tan, 2002).

4.4.4 Schwerwiegende Probleme

Fehlerhafte Objektverdeckungen (engl. occlusion, object interposition failures): Fehlerhafte Objektverdeckungen von realen und virtuellen Objekten sind in MR-Systemen häufig „unvermeidbar" (vgl. Azuma et al., 2001) und haben den stärksten Einfluss auf die Wahrnehmung von Objekttiefe und räumlichen Beziehungen. Sie können potenziell alle anderen Tiefeninformationen außer Kraft setzen. Wenn zur Darstellung, wie beispielsweise in Holobench- und CAVE-Installationen, Rückprojektionssysteme eingesetzt werden, verdecken reale Objekte immer virtuelle Objekte, unabhängig von deren räumlicher Konfiguration (vgl. Abbildung 33). Systeme die in der Lage sind, Verdeckungen zwischen virtuellen und realen Objekten korrekt darzustellen, bilden virtuelle Szenen aus der Blickrichtung des Benutzers auf Projektionsflächen oder auf die Objekte der Umgebung ab (vgl. Inami et al., 2000). Oder sie bringen, beispielsweise mittels Head Mounted Displays (HMDs), künstliche Projektionsflächen zwischen den Benutzer und die realen Objekte ein (vgl. Lok, 2004; Lee et al., 2005).

Verdeckungen zwischen realen und virtuellen Objekten korrekt darzustellen erfordert ein vollständiges Modell der realen Umgebung, insbesondere der Objektentfernungen (Tiefenpuffer), welche in Echtzeit in vielen Situationen nicht oder nur eingeschränkt erstellt werden können. Erste Lösungen für HMD-basierte AR-Systeme schlagen Breen et al. (1996) vor, die einerseits in einem kamerabasierten Ansatz Tiefeninformationen der Umgebung generieren und andererseits in einem modellbasierten Ansatz die physischen Objekte der Umgebung mittels a priori erstellter statischer Geometriemodelle als transparente Phantomobjekte in den Darstellungsprozess einfließen lassen.

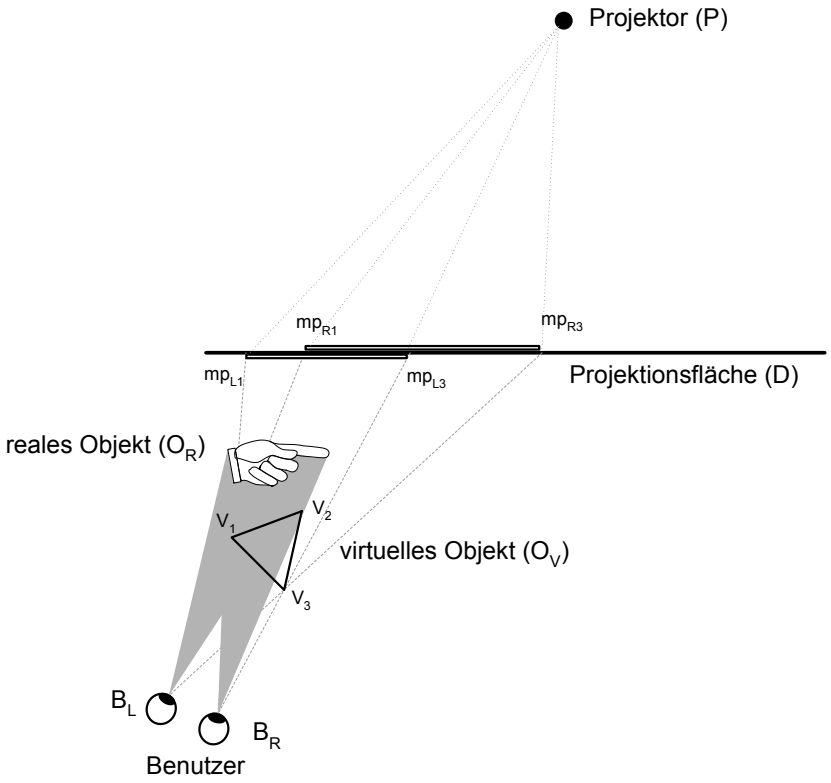


Abbildung 33: Fehlerhafte Verdeckung eines virtuellen Objekts (Dreieck) in einem VR-Rückprojektionssystem, verursacht durch ein dahinter liegendes reales Objekt (Hand).

Lepetit und Berger (2000) erstellen Datenmodelle der Umgebung durch bildbasierte Extraktion von Objektsilhouetten und sind in der Lage, für einfache Szenen korrekte Überlagerungen in Echtzeit darzustellen. Lok et al. schlagen vor, reale Objekte visuell zu erfassen (engl. *tracking*) und mit virtuellen Hüllen zu umgeben. Diese werden, anders als beim modellbasierten Ansatz von Breen et al. (1996), neben den rein virtuellen Objekt(-teilen) ebenfalls in virtuelle Umgebungen projiziert (vgl. Abbildung 34). Da sowohl reale als auch virtuelle Objekte eine digitale Repräsentation besitzen, kann das VR-System Verdeckungen korrekt berechnen und darstellen. Auch die physische Manipulierbarkeit bleibt erhalten, allerdings auf Kosten der „natürlichen" visuellen Eigenschaften (vgl. Lok, 2004; Lok et al., 2004).

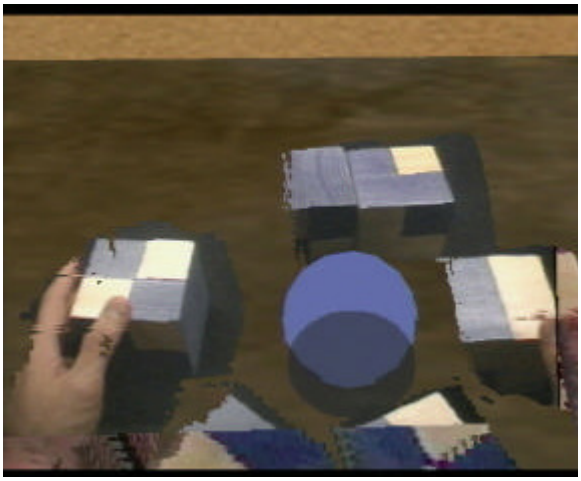


Abbildung 34: Interaktion mit realen Objekten mitsamt grafischer Hülle (Würfel) und einem rein virtuellen Objekt (Kugel; aus Lok et al., 2004, S. 108). Abdruck mit freundlicher Genehmigung des Department of Computer Science, University of North Carolina at Chapel Hill.

Erweiterte Schärfentiefe (engl. expanded depth of field, DOF): Stereoskopische Anzeigen haben eine unendliche oder stark erweiterte Schärfentiefe, da alle virtuellen Objekte auf denselben flachen Projektionsebenen des Systems exakt scharf abgebildet werden. Dies kann zu Ablenkung, Konzentrationsverlust und Beeinträchtigungen der Tiefenwahrnehmung führen. Möglichkeiten, Schärfentiefe künstlich zu erzeugen, bestehen darin, diejenigen Objekte, die außerhalb des Blickfokus liegen, grafisch mit geringerer Schärfe darzustellen (vgl. Mulder & Liere, 2000). Dazu muss dem System jedoch der Blickkonvergenzpunkt des Benutzers bekannt sein, was den technischen Gesamtaufwand erhöht.

Akkommodations-Konvergenz-Konflikt (engl. accommodation-vergence conflict): In stereoskopischen VR-Installationen akkommodieren (fokussieren) die Augen des Betrachters entsprechend der Entfernung der Projektionsfläche, konvergieren aber entsprechend der Position des betrachteten virtuellen Objekts (vgl. Konvergenz, Abschnitt 4.1.1, S. 60). Verglichen mit der Wahrnehmung realer Objekte, bei denen Konvergenzpunkt und Akkommodationsebene stets zusammen liegen, stehen Akkomodation und Konvergenz in stereoskopischen Anzeigen in einem Konflikt. Da die Akkomodation Einfluss auf die Tiefenwahrnehmung hat, verschiebt sich die wahrgenommene Tiefe des virtuellen Objekts in Richtung der Projektionsebene (vgl. Abbildung 35).

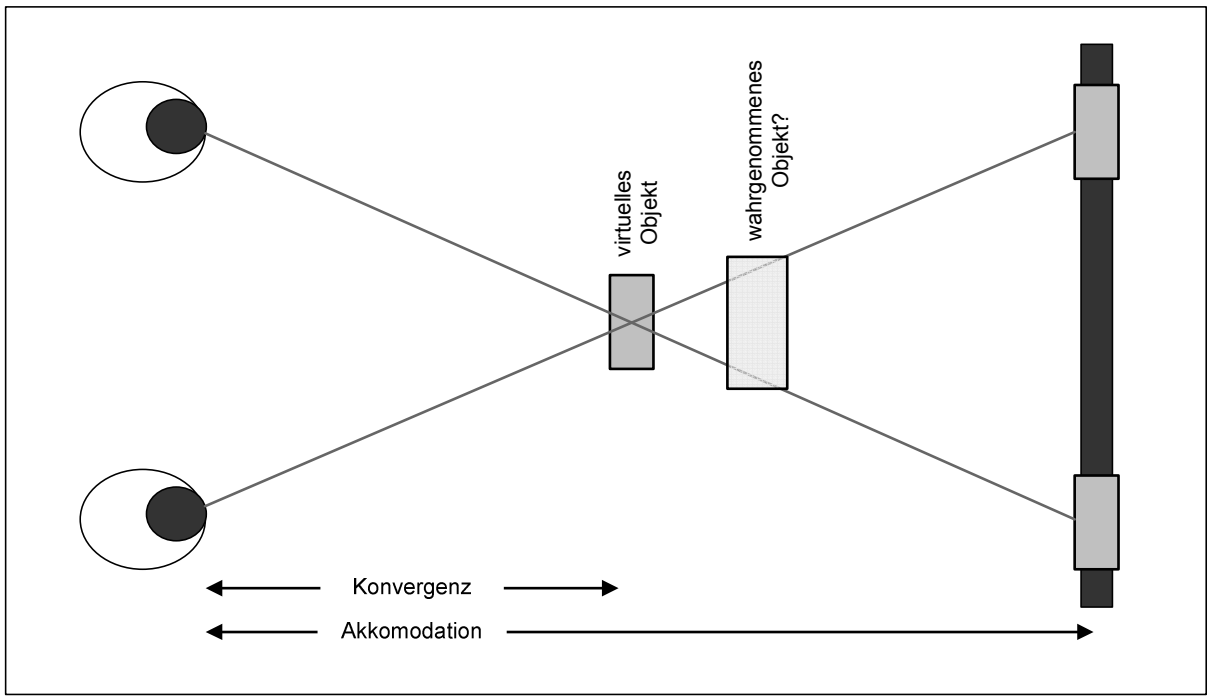


Abbildung 35: Akkommodations-Konvergenz-Konflikt bei der Wahrnehmung virtueller Objekte auf statischen Projektionsflächen (nach Drascic & Milgram, 1996, S. 132).

Akkommodationsversatz (engl. accommodation mismatch): Die Nachteile einer statischen Akkommodationsebene treten insbesondere dann auf, wenn reale, physische Objekte in den Interaktionsraum eingebracht werden, beispielsweise Interaktionsgeräte, Props oder die Hände des Benutzers. Befinden sich virtuelle Objekte an derselben Position wie diese physischen Objekte, beispielsweise wenn der Benutzer ein virtuelles Objekt mit seinen Händen greifen will, nimmt der Benutzer für beide Objekte unterschiedliche Tiefeninformationen (engl. *depth cues*) wahr (vgl. Abbildung 36). Daraus leitet er ab, dass sich das virtuelle und das physische Objekte an unterschiedlichen Positionen befinden müssen. Der Akkommodationsversatz ist ein wesentlicher Grund dafür, dass das Greifen virtueller Objekte mit bloßen Händen sehr schwer fällt (vgl. Drascic & Milgram, 1996). Um den Akkommodationsversatz bei der manuellen Interaktion mit virtuellen Objekten zu verringern, stellten Fehn und Pastoor (2006) ein autostereoskopisches Display vor, das die Akkommodationsebene in den Interaktionsraum hinein verschiebt, so dass diese circa 30 Zentimeter vor der sichtbaren Displayfläche liegt. Für virtuelle Objekte, die auf dieser Akkommodationsebene positioniert werden, ist der Akkommodations-Konvergenz-Konflikt nur noch unwesentlich wahrnehmbar. Anwender können virtuelle Objekte beispielsweise „in den Händen halten“, da die Akkommodationsebenen der Hände und des virtuellen Objekts annähernd identisch sind. Die Probleme fehlerhafter Objektverdeckungen (engl. *occlusion*) bestehen allerdings weiter.

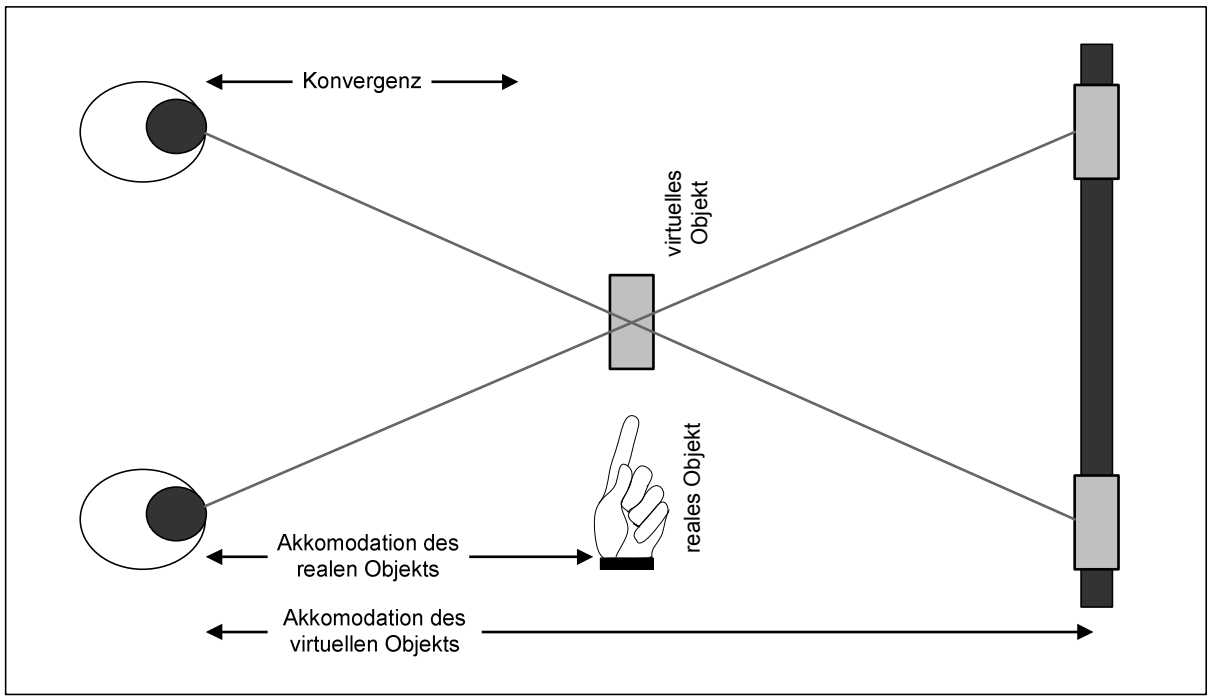


Abbildung 36: Akkommodationsversatz bei der Wahrnehmung virtueller und realer Objekte (nach Drascic & Milgram, 1996, S. 133).

Fehlende virtuelle Schatten auf realen Objekten (engl. absende of shadow cues): Schatten liefern wichtige Tiefeninformationen zur Lage und Ausrichtung von Objekten (Abschnitt 4.1.1, S. 60). Werden reale Objekte in virtuelle Umgebungen eingebracht, besteht daher die Herausforderung, Schattenwürfe virtueller Objekte auf realen Objekten darzustellen. Dies ist bisher jedoch nur dann möglich, wenn der Benutzer HMDs trägt und ein Modell der realen Szene bekannt ist, so dass im resultierenden Bild virtuelle Schatten korrekt eingeblendet werden können (vgl. Haller et al., 2003). Mit Rückprojektionssystemen sind derartige Schattenwürfe dagegen bisher nicht darstellbar, somit fehlen hier wichtige Tiefeninformationen.

Fixationsdauer (engl. fixation duration): In virtuellen Szenen ist die Fixationsdauer länger als in realen Szenen. Weiterhin widmen Benutzer in virtuellen Umgebungen bewegten Objekten weit mehr Aufmerksamkeit als in realen Umgebungen. Insgesamt blicken Benutzer in virtuellen Umgebungen seltener umher als in realen Szenen (vgl. Howlett et al., 2005).

Fehleinschätzungen von Größen und Entfernungen (engl. errors on size and distance estimations): Räumliche Distanzen in immersiven virtuellen Umgebungen werden von Benutzern stets unterschätzt, insbesondere wenn sie Head Mounted Displays (HMDs) tragen. Dieser Effekt kann bisher nicht auf technische Parameter zurückgeführt werden (vgl. Willemsen et al., 2004; Willemsen et al., 2008). In immersiven virtuellen Umgebungen, die Abbilder gut bekannter Räume darstellen, zeigt sich dieser Effekt jedoch nicht (vgl. Interrante et al., 2006). Mohler et al. (2006) zeigten, dass kontinuierliches visuelles Feedback eine Vorraussetzung für korrekte Entfernungseinschätzung ist.

- ▷ Die Determinanten der Benutzerperformance in virtuellen dreidimensionalen Systemen sind neben aufgabenbezogenen Größen wie Objekt- und Zielvolumen sowie Zielrichtung folgende technische Parameter:
  - die Verzögerungszeit des gesamten technischen Systems,
  - die Bildwiederhol- und Samplingrate des Darstellungs- und Trackingsystems,
  - die Repräsentationsform der Manipulationsobjekte.
- ▷ Zahlreiche technische Beschränkungen verhindern, dass virtuelle Umgebungen identisch zu realen Umgebungen wahrgenommen werden.
- ▷ Werden reale und virtuelle Umgebungen gemischt, ergeben sich zusätzliche technische und wahrnehmungsbezogene Probleme, aber auch Potenziale.
- ▷ Während viele technische Probleme in absehbarer Zeit wahrscheinlich gelöst werden, ist die Lösung einiger „schwerwiegender" Probleme, insbesondere korrekte Verdeckungen (engl. *occlusion*) und natürliche Akkomodation, bisher nicht absehbar.

4.5 Mixed Reality und Tangible User Interfaces

In den vorangegangenen Abschnitten 4.3 (S. 70) und 4.4 (S. 84) wurde einerseits auf die Möglichkeiten verwiesen, Anwendern die algorithmische Mächtigkeit (engl. *computational power*) von Computersystemen mittels Virtual Reality Technik interaktiv zu erschließen. Andererseits konnten auch schwerwiegende Probleme identifiziert werden, die bei der Interaktion mit virtuellen Objekten auftreten und diese wesentlich von der Interaktion mit realen Objekten unterscheiden. Die meisten der in Abschnitt 4.4.1 (S. 85) genannten Störgrößen treten in der Interaktion mit physischen Objekten dagegen nicht auf (vgl. Seichter & Kvan, 2004). Zu den wichtigsten Vorzügen physischer Objekte gegenüber virtuellen Objekten zählen unter anderem (vgl. Tabelle 3, S. 100):

- zeitlich und räumlich synchrone Wahrnehmung visueller und haptischer Eigenschaften,
- hoch aufgelöste visuelle Darstellung,
- greifbarer/flächiger Zugriff auf die Objektoberfläche und
- unmittelbares Feedback auf Krafteinwirkungen.

Die Nachbildung vieler basaler Eigenschaften physischer Objekte kann mit Simulationsgeräten bisher nicht oder nur mit häufig unvertretbar hohem Aufwand geleistet werden. Aus diesem Grund hat der Ansatz, physische Objekte und virtuelle Objekte in hybriden virtuell/realen Umgebungen zu integrieren, in vielfältiger Form Einzug in Interaktionskonzepte gefunden. Entsprechende Konzepte sind unter anderem Props bzw. Passive Haptische Displays (Abschnitt 4.3.5.2, S. 81), Augmented und Mixed Reality (Abschnitt 4.3, S. 70), Hybride Objekte (vgl. Lok, 2004),

Tangible User Interfaces (vgl. Fitzmaurice et al., 1995; Ishii & Ullmer, 1997; Hornecker & Buur, 2006), Tangible AR (vgl. Bowman et al., 2005), Embodied Interaction (vgl. Dourish, 2001) und Physicality (vgl. Dix, 2006).

In den folgenden Abschnitten werden zunächst die Vorteile der Interaktion mit physischen Objekten aus der Sicht des Forschungsfeldes Tangible User Interaction (TUI) dargestellt. Dem folgt die Diskussion der Möglichkeiten zur Integration von TUIs in virtuelle Umgebungen anhand der Taxonomie „Real and Virtual World Display Integration" von Milgram und Colquhoun (1999). Schließlich betrachtet der Abschnitt 4.5.3 (S. 98) Strategien zur Funktionsallokation zwischen virtuellen und realen Anteilen hybrider Umgebungen.

4.5.1 Fühlbare Benutzungsschnittstellen (Tangible User Interfaces)

Fühlbare Benutzungsschnittstellen (engl. *Tangible User Interfaces, TUI*) stellen eine neue Klasse von Benutzungsschnittstellen dar, die in phänomenologischer Tradition die physische Umgebung des Benutzers als primäre Quelle seines Vorwissens, seiner Fähigkeiten und Fertigkeiten sowie der Bedeutung seiner Handlungen betrachtet. „Da wir hoch entwickelte Fertigkeiten zur Interaktion mit Objekten in der realen Welt entwickelt haben – Fertigkeiten zu erforschen, wahrzunehmen, abzuschätzen, zu manipulieren und zu navigieren – können wir Benutzungsschnittstellen einfacher machen, indem wir auf diesen Fertigkeiten aufsetzen (...) anstelle der abstrakten, symbolischen Repräsentationsformen und Interaktionen, die konventionelle Schnittstellen kennzeichnen." (Dourish, 2001, S. 206)

Kennzeichen von Tangible Interfaces ist, dass sie physische Elemente aufweisen, die sowohl als Regler (engl. *control*), gleichzeitig aber auch als Repräsentation des digitalen Modells des Systems dienen. Diese physischen Objekte können „wahrnehmbar" an digitale Repräsentationen gekoppelt sein. Digitale Repräsentationen dienen jedoch nicht als Regler (vgl. Abbildung 37). Durch die nahtlose Verknüpfung von physischer Repräsentation und physischem Regler in einem Objekt, verliert die Unterscheidung in Ein- und Ausgabeelemente ihre Bedeutung (vgl. Ullmer & Ishii, 2001). Tangible Interfaces bieten daher eine Möglichkeit, „unmittelbar" an einem digitalen Modell zu arbeiten, und eignen sich daher besonders für kreative Selbstkommunikationsprozesse (Abschnitt 3.1.5, S. 43).

Hornecker und Buur (2006) nennen vier Dimensionen, in denen Tangible Interfaces Innovationen hervorgebracht haben: Erstens, mit physischem Material interagieren zu können und dieses multisensorisch zu erfahren (engl. *tangible manipulation*), zweitens raumgreifend interagieren zu können, d. h. die räumliche Lage der Elemente der Schnittstelle in das Interaktionsalphabet einzubeziehen (engl. *spatial interaction*), drittens durch die physische Gestaltung sowohl Möglichkeiten als auch Begrenzungen des Systems (Affordances und Constraints, vgl. Norman, 1988; 1990) kodieren zu können (engl. *embodied facilitation*) und viertens mittels Tangible Interfaces emotional ausdrucksstarke Repräsentationen erstellen zu können (engl. *expressive representation*). In einer Metastudie ermittelten Sharlin et al. (2004), dass insbesondere solche Tangible Interfaces erfolgreich eingesetzt werden, die nach folgenden Gestaltungsprinzipien entworfen wurden:

- Gelungene räumliche Zuordnungen (engl. *successful spatial mappings*): Erfolgreiche Tangible User Interfaces reagieren auf die Manipulation der physischen Elemente der Schnittstelle so,

wie es der Benutzer erwartet. Der Benutzer hat über die physische Schnittstelle Zugriff auf wichtige Systemfunktionen, die ihn bei der Lösung seiner Aufgabe unterstützen.

- Einheitlicher Eingabe- und Ausgaberaum (engl. *unified input and output space*): Erfolgreiche Tangible User Interfaces verbinden den Wahrnehmungsraum (output) und den Bewegungsraum (input), d. h. die Wirkungen der Manipulation werden am selben Ort sichtbar, an dem auch die Manipulation erfolgt.
- Unterstützung von Versuch und Irrtum (engl. *enabling trial-and-error activity*): Erfolgreiche Tangible User Interfaces fördern in besonderer Weise das Erlernen von Systemfunktionen über Versuch und Irrtum.

Eine beispielhafte Umsetzung des TUI-Konzeptes ist die Anwendung Senseboard (vgl. Abbildung 38), in der abstrakte digitale Informationen wie beispielsweise Nachrichten, Termine oder Textbausteine durch die Manipulation physischer Elemente, hier magnetische Klötzchen, auf einem Tableau verschoben werden können. Die Manipulation der physischen Objekte bewirkt unmittelbare Änderungen am digitalen Datenmodell der Anwendung, beispielsweise eines Kalenders oder einer Textverarbeitung. Anders als in herkömmlichen GUI-basierten Anwendungen ist hier eine flüssige, beidhändige und schnelle Interaktion von mehreren Benutzern gleichzeitig möglich (vgl. Jacob et al., 2002). Da die Anwendung mehrere physische Zugriffspunkte zur Verfügung stellt, implementiert sie das spacial-multiplexed Konzept (Abschnitt 4.3.5.1, S. 79).

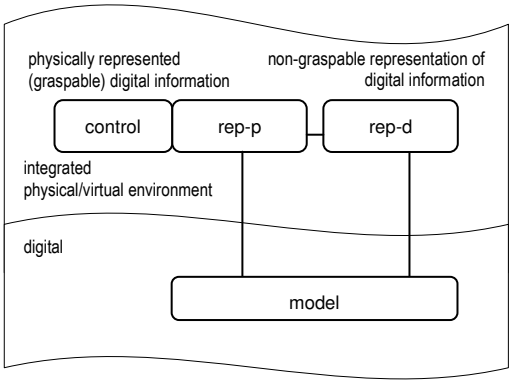


Abbildung 37: Model-Control-Representation-physical-digital (MCRpd) Interaktionsmodell für Tangible Interfaces (Ullmer & Ishii, 2001).

Ein weiteres Beispiel eines Tangible User Interface findet sich in der Anwendung Illuminating Clay (vgl. Piper et al., 2002). Hier können die Benutzer digitale Datenmodelle verändern, indem sie eine flexible Masse aus Granulatelementen manipulieren, auf die wiederum digitale Informationen projiziert werden (vgl. Abbildung 39). Die Granulatmasse wird kontinuierlich von einem Laserscanner abgetastet, so dass das System unmittelbar auf Veränderungen reagieren und die Projektion an die Ausrichtung der Granulatmasse anpassen kann. Anwendung findet das System beispielsweise bei der Landschaftsplanung, wobei die projizierten Daten farbige Landschaftsmo-

delle darstellen, aus denen wiederum Schattenwürfe, Landerosionen und Sichtbarkeiten bestimmt werden können. Auch in dieser Anwendung stellt das Eingabemedium (das Granulat) gleichzeitig das Ausgabemedium dar, da die durch das Granulat gebildete dreidimensionale Form und die Form der darauf projizierten Landschaft einander entsprechen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten:

- Tangible User Interfaces bieten einen direkten, physischen Zugriff auf digitale Datenmodelle.
- Tangible User Interfaces erlauben es dem Anwender, seine Fertigkeiten im Umgang mit physischen Objekten anzuwenden. Dies kann durch eine aufgabenspezifische Gestaltung der Interaktionsobjekte befördert werden.
- Tangible User Interfaces sind inhärent räumlich, sie setzen den Raum als Interaktionsmedium ein.
- Tangible User Interfaces unterstützen die Erzeugung externer Repräsentationen und sind daher geeignet für kreative Selbstkommunikationsprozesse.

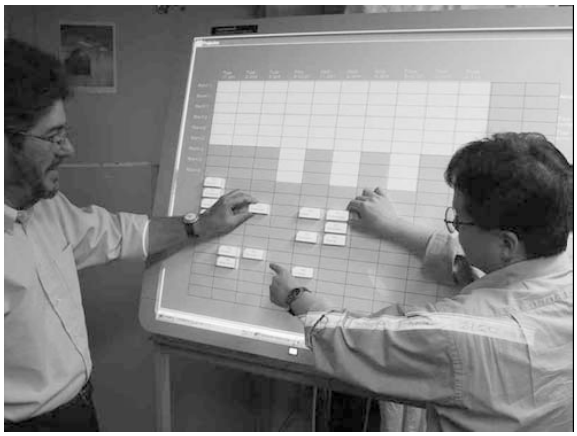


Abbildung 38: TUI Beispiel: Senseboard
aus Sharlin et al. (2004, S. 343; vgl. auch Jacob et al., 2002).



Abbildung 39: TUI Beispiel: lluminating Clay
aus Sharlin et al. (2004, S. 342; vgl. auch Piper et al., 2002).

4.5.2 Mixed Reality: Tangible User Interfaces in Virtual Environments

Die interaktiven Eigenschaften realer und virtueller Objekte sind in wichtigen Eigenschaften komplementär (Abschnitt 4.5.2, S. 96). So vermitteln reale, physische Objekte beispielsweise ein unmittelbares physisches Feedback, während sie manipuliert werden, virtuelle Objekte dagegen

nicht. Virtuelle Objekte können wiederum hoch interaktiv auf Manipulationen reagieren, physische Objekte sind dagegen an ihre physische Konfiguration gebunden. Physische und virtuelle Objekte in virtuellen Umgebungen zu integrieren ist daher ein gebräuchlicher Ansatz zur Verbesserung der Gebrauchstauglichkeit von VR-Systemen (vgl. u. a. Weiser, 1993; Milgram & Kishino, 1994; Hinckley et al., 1994a; Ishii & Ullmer, 1997; Lok, 2004). Das Kontinuum der Virtualität von Milgram und Kishino (1994) fasst dieses Konzept unter dem Überbegriff „Mixed Reality" zusammen (Abschnitt 4.3, S. 70, vgl. Abbildung 23).

Der Gestaltungsraum zur Integration virtueller und realer Objekte wird von Milgram und Colquhoun (1999) in einem Kongruenz-Kontinuum spezifiziert (vgl. Abbildung 40). Dieses beschreibt Möglichkeiten des Benutzers, die Form, Position und Orientierung virtueller Objekte mittels physischer Objekte oder Interaktionsgeräte zu manipulieren. Kongruente Abbildungen (engl. *mappings, transfer functions*) korrespondieren mit „natürlichen" bzw. „intuitiven" (a. a. O., S. 15) Interaktionsverhalten, wogegen inkongruente Abbildungen vom Benutzer mentale Transformationen erfordern, um durch Manipulationen eines physischen Objekts eine intendierte Manipulation eines virtuellen Objekts zu bewirken. Das Kongruenz-Kontinuum gliedert sich in drei Subskalen:

- *Direktheit (engl. direct control, isomorphism)* bezieht sich darauf, ob Anwender direkt mit einem Objekt interagieren oder zur Manipulation Werkzeuge einsetzen (engl. *tool use, indirect control*).
- Die Skala *Ausrichtung (engl. alignment)* beschreibt den Versatz zwischen der wahrgenommenen Position eines physischen Objekts bzw. Geräts und der Lage eines korrespondierenden virtuellen Objekts (vgl. Versatz der Bezugssysteme, Abschnitt 4.4.3, S. 86).
- Die *Stufung der Kontrolle (engl. control order)* gibt an, ob Manipulationen am physischen Objekt direkt auf das virtuelle Objekt übertragen werden (Stufe 0) oder zunächst über eine oder mehrere Stufen integriert werden, bevor die resultierende Manipulation bestimmt und am Objekt ausgeführt wird (Stufen eins bis n).

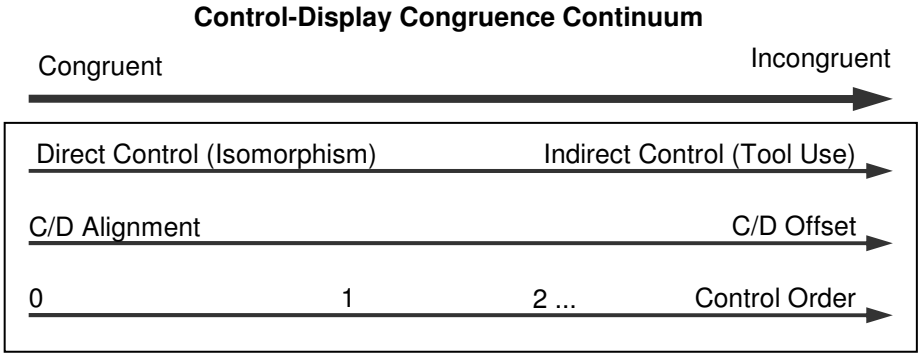


Abbildung 40: Kongruenz-Kontinuum (engl. Control-Display Congruence Continuum, aus Milgram & Colquhoun, 1999, S. 20).

Eingabegeräte wie Computermäuse oder Desktop-VR-Eingabegeräte (z. B. Spacemouse) haben beispielsweise einen großen Versatz zum kontrollierten virtuellen Objekt, häufig müssen verschiedene Tasten betätigt werden, um zwischen Manipulationsmodi zu wechseln (Kontrollstufe > 0). Solche Eingabegeräte vermitteln dadurch indirekte Kontrolle. HMD-basierte Augmented Reality Anwendungen ermöglichen dagegen beispielsweise in der Regel direkten Zugriff auf virtuelle Objekte, da diese typischerweise versatzlos mit physischen Objekten verbunden sind, deren Manipulation sich direkt auf das virtuelle Objekt auswirkt (Kontrollstufe=0).

Zusammenfassend lässt sich festhalten:

- Eine kongruente Gestaltung von Mixed Reality Benutzungsschnittstellen verspricht direkten und „natürlichen" Zugriff auf virtuelle Objekte und virtuelle Umgebungen.

4.5.3 Funktionsallokation in Mixed Reality-Systemen

Im Entwicklungsprozess von Mixed Reality-Systemen stellt sich neben den in den vergangenen Abschnitten diskutierten Integrationsstrategien die Frage, welche Anteile des Systems virtuell und welche physisch repräsentiert werden sollen. Leider erfahren MR-Entwickler hier bisher kaum methodische Unterstützung. Die Ausgestaltung der physisch/virtuellen Schnittstelle, die Gestaltung des spezifisch hybriden Charakters und insbesondere die konkrete Entscheidung für virtuelle oder physische Schnittstellenelemente ist bisher kaum systematisch gefasst, sondern erfolgt vorrangig intuitions- und emotionsgesteuert (vgl. Hornecker, 2007a). Die Entwicklung spezifischer hybrider digital/physischer Entwurfsmuster (engl. *design pattern*) und die empirische Untersuchung der spezifischen Affordances hybrider Systeme erscheint daher notwendig (Kapitel 8 und 9).

Eine umfassende systematische Gegenüberstellung der Eigenschaften virtueller und physischer Umgebungen und Objekte bieten Gjerlufsen and Olsen (2007), die sich wiederum an den Arbeiten des britischen Philosophen Unger (2006) zur Natur der physischen Welt orientieren. Sie unterscheiden Physikalität und Digitalität in den Dimensionen Substanz/Material, räumliche Ausdehnung, räumliche Position und räumliche Referenzierung/Nachbarschaft. Hurtienne, Israel und Weber (2008) entwickelten daraus eine Unterstützungsmethode für Entwickler hybrider Benutzungsschnittstellen, die eine Funktionsallokation zwischen physischen und virtuellen Systemanteilen vorsieht. In ähnlicher Weise wie die MABA-MABA-Listen („Machines Are Better At – Men Are Better At"; Fitts, 1951), die in den 1950er Jahren zur Aufteilung von Systemfunktionen auf Maschine und Operateure genutzt wurden, stellen Hurtienne et al. sogenannte PIBA-DIBA-Listen („Physicality Is Better At – Digitality Is Better At") vor, mittels derer Entwickler entscheiden können, welche Schnittstellenanteile virtuell und welche physisch repräsentiert werden können (vgl. Tabelle 3).

▷ Neben der Gestaltung der Schnittstelle zwischen Benutzer und technischem System erfordern hybride Systeme eine methodisch unterstützte Gestaltung der physischen und virtuellen/digitalen Anteile der Schnittstelle.

Tabelle 3: Spezifische Vorteile physischer und virtueller Objekte in digitalen Systemen.

„Physicality Is Better At“	**„Digitality Is Better At“**
Physikalisches Material	Binäre Substanz
P11: Die intrinsischen mechanischen Eigenschaften eines physischen Objekts (beispielsweise Form) können leicht manipuliert werden. P12: Physische Objekte können einfach gegriffen werden, keine Trennung zwischen mentalem und physischem Greifen. P13: Physische Objekte liefern unmittelbar passives haptisches Feedback. P14: Physische Objekte haben nur eine Ausprägung (sie sind einmalig). P15: Physische Objekte benötigen kein digitales Betriebssystem, um zu funktionieren. P16: Die visuellen Eigenschaften (Helligkeit, Kontrast, Textur) unterliegen keinen Restriktionen durch Anzeigegeräte und Projektionssysteme.	D11: Intrinsische visuelle Eigenschaften digitaler Objekte, wie Textur. Farbe, Beschriftungen und Form, können digital leicht verändert werden. D12: Digitale Objekte können einfach von digitalen Algorithmen verarbeitet werden. D13: Digitale Objekte können „aus dem Nichts“ erzeugt werden. D14: Digitale Objekte können als Kopien anderer Objekte erzeugt werden. D15: Digitale Objekte können leicht gespeichert, gelöscht oder auf ihren Ursprungszustand zurückgesetzt werden.
Räumliche Ausdehnung	Kleinste Ausdehnung
P21: Physische Objekte sind unmittelbar sichtbar, sie benötigen keine informationstechnische Infrastruktur. P22: Anwender können ihre sensumotorischen Fähigkeiten auf die Manipulation physischer Objekte anwenden.	D21: Digitale Objekte verursachen vergleichsweise geringe Wartungskosten. D22: Digitale Objekte verbrauchen keinen physischen Lagerplatz. D23: Geometrische Größe ist kein Kostenfaktor für digitale Objekte.
Räumliche Position	Allgegenwärtigkeit
P31: Extrinsische mechanische Eigenschaften physischer Objekte wie Position und Orientierung können vom Anwender leicht manipuliert werden. P32: Während der Interaktion mit physischen Objekten stimmen Wahrnehmungs- und Bewegungsraum stets vollständig überein. P33: Der physische Bezugsraum ist für alle Anwender gleich, dies ermöglicht deiktische Zeigegesten zwischen mehreren Anwendern. P34: Physische Objekte ermöglichen räumlich verteilten Zugriff (engl. *space multiplexed control*), alle physischen Objekte können potenziell zur gleichen Zeit manipuliert werden.	D31: Digitale Objekte können mit geringem Aufwand an entfernte Orte gesendet werden (beispielsweise via digitaler Netzwerke) D32: Digitale Objekte können aufwandsarm verteilt werden, ohne dadurch physischen Aufwand zu verursachen.
Räumlicher Bezug	Referenzierbarkeit
P41: Physische Begrenzungen (engl. *physical constraints*) können zur Kodierung von Applikationssemantik verwendet werden (beispielsweise das Entriegeln einer Tür, das erforderlich ist, um den dahinter liegenden Raum zu betreten).	D41: Digitale Objekte können mittels digitaler Referenzen adressiert und einfach in komplexen hierarchischen oder netzwerkartigen Strukturen verwaltet werden.
Analoges Interaktionsalphabet	Digitales Interaktionsalphabet
P51: Benutzer können mittels physischer Manipulationen schnell interagieren und viele Informationen generieren, indem sie beispielsweise ihren Körper bewegen, Gesten erzeugen oder physische Objekte manipulieren. P52: Benutzer können physische Objekte schnell anordnen und dadurch Informationen gruppieren und sortieren (beispielsweise das Einlegen von Blättern in einen Ordner).	D51: Digitale Systeme bieten Möglichkeiten, zeitlich diskret Informationen wie Zahlen, Zeichen, Wörter und Schnittstellenereignisse (beispielsweise Mausklicks) einzugeben und darauf in Echtzeit zu reagieren.

Dem Ansatz der systematischen Funktionsallokation zwischen physischen und virtuellen Anteilen der Interaktionsschnittstelle folgend, können Gestaltungsvarianten für Interaktionswerkzeuge in immersiven Umgebungen abgeleitet werden. Aus den basalen Eigenschaften virtueller und physischer Umgebungen und Objekte lassen sich drei grundsätzliche Gestaltungsvarianten ableiten: physische Objekte, hybride Objekte und virtuelle Objekte, die das PHV-Kontinuum in Abbildung 41 zusammenfasst. Bei der Gestaltung spezifischer MR-Anwendungen, beispielsweise des immersiven Skizzierens, sollte diese Funktionsallokation unter Abwägung der in Tabelle 3 und Abbildung 41 genannten Vor- und Nachteile erfolgen, um eine optimale Gestaltung der Interaktionsschnittstelle zu erreichen.

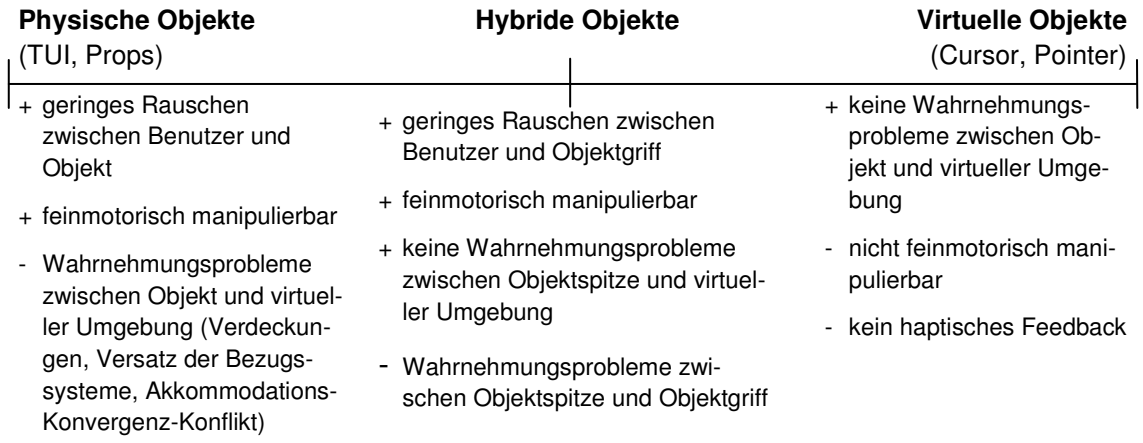


Abbildung 41: PHV-Kontinuum physischer, hybrider und virtueller Objekte in Mixed Reality-Umgebungen.

Interaktion mittels physischer Objekte: Der Benutzer interagiert mittels eines physischen Werkzeugs (Tangible User Interfaces, Props, vgl. Abbildung 42 und Abschnitte 4.3.5.2, S. 81, und 4.5.1, S. 94), das Rauschen zwischen Benutzer und Werkzeug ist minimal, er kann durch das Werkzeug „hindurch" arbeiten (es ist transparent bzw. zuhanden, vgl. Heidegger, 1927; Winograd & Flores, 1986). Die multisensorische Integration zwischen der Hand des Benutzers und dem Objektgriff ist optimal (Abschnitt 4.1.3, S. 66). Physische Interaktionsgeräte erleichtern „mental-motorische Prozesse" und die Anwendung prozeduralen Wissens. Der Aufforderungscharakter (Affordances) physischer Interaktionsobjekte (beispielsweise physischer Stifte) ist ein qualitativ anderer als der virtueller Objekten (beispielsweise ein virtueller Cursor). Physische Objekte erlauben den Einsatz feiner Muskelgruppen der Hand. Physische Objekte reagieren unmittelbar auf physische Manipulationen, das haptische Feedback erfolgt unmittelbar. Die Wahrnehmung physischer Objekte ist zeitlich und räumlich synchron (und damit optimal; Abschnitt 4.1.3, S. 66). Es treten jedoch Probleme der Wahrnehmung des physischen Werkzeugs in der virtuellen Umgebung auf (Verdeckungen, Versatz der Bezugssysteme, Akkommodations-Konvergenz-Konflikt).

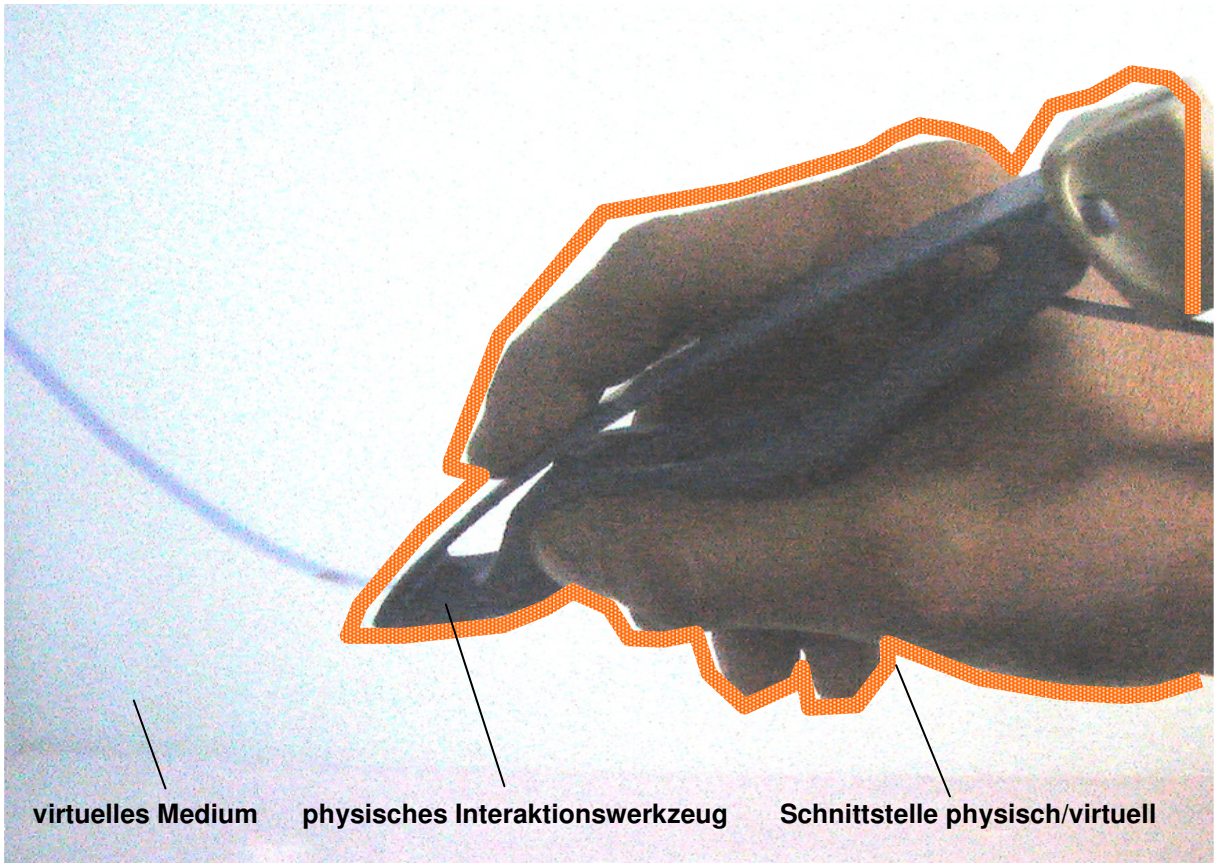


Abbildung 42: Interaktion mittels physischer Objekte.

Interaktion mittels virtueller Objekte: Der Benutzer interagiert mit bloßer Hand (bzw. einem Datenhandschuh) im virtuellen Raum, die Hand steuert optional einen virtuellen Cursor (vgl. virtual hand, Abbildung 43, Abschnitt 4.3.3, S. 75) bzw. ein virtuelles Werkzeug. Das Rauschen zwischen Benutzer und Cursor ist aufgrund zeitlich/räumlicher Asynchronizität, Verdeckungen, Versatz der Bezugssysteme und aufgrund des Akkommodations-Konvergenz-Konflikts hoch. Der Anwender kann weiterhin feinmotorische Bewegungen der Hand und der Finger nur begrenzt auf den virtuellen Cursor übertragen, ein haptisches Feedback wird nicht vermittelt. Da die Darstellung des virtuellen Cursors jedoch mit derselben Technologie wie die virtuellen Mediums erfolgt, ist dieser optimal in das virtuelle Medium integriert, es besteht zeitlich räumliche Synchronizität zwischen Cursor und virtuellem Medium, auch treten keine Verdeckungen, kein Versatz der Bezugssysteme und kein Akkommodations-Konvergenz-Konflikte auf.

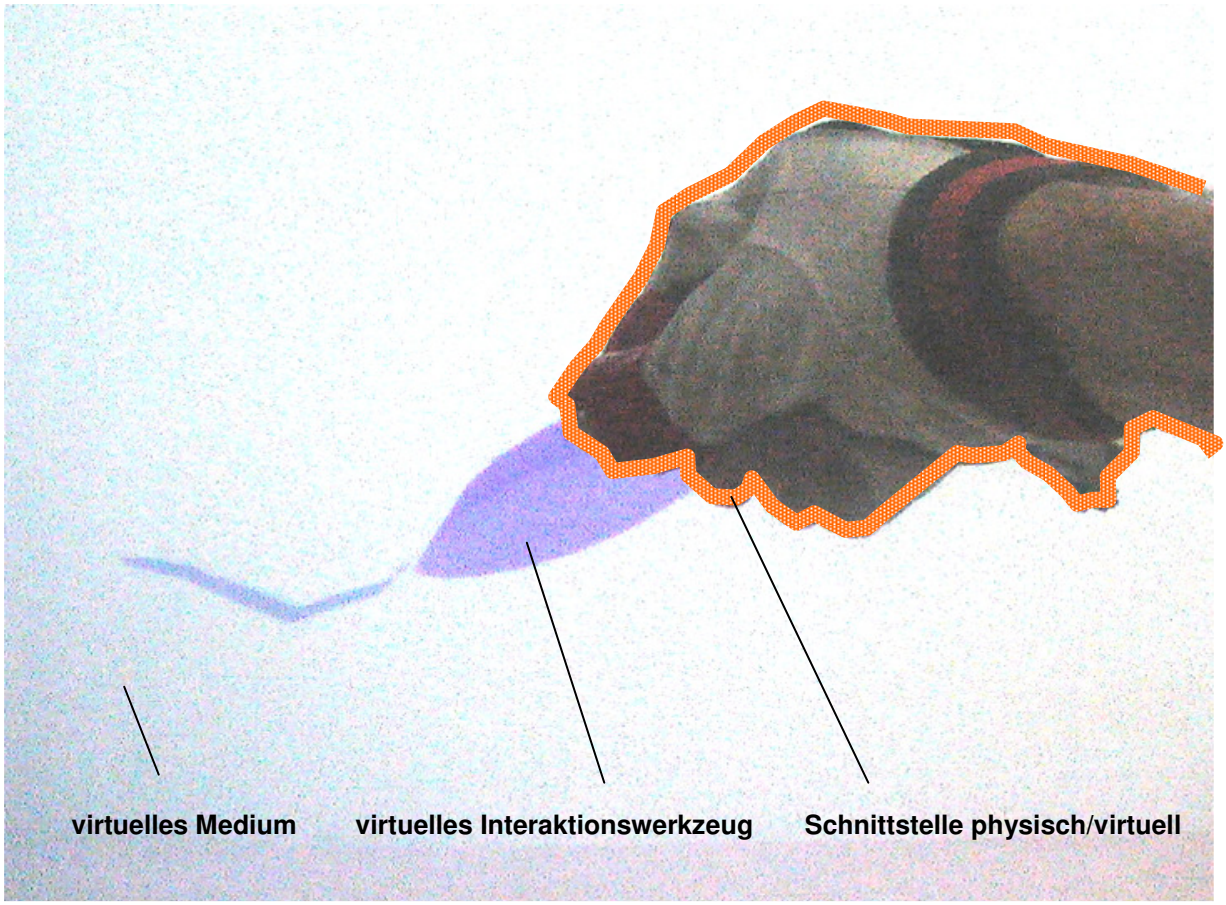


Abbildung 43: Interaktion mittels virtueller Objekte.

Interaktion mittels hybrider Objekte: Der Benutzer interagiert mittels eines physischen Werkzeugs, das Rauschen zwischen Benutzer und Werkzeug ist minimal (s. o.), er kann insbesondere die Feinmuskulatur der Hand und seiner Finger zur Manipulation des physischen Objekts anwenden. Das Objekt ist jedoch geteilt, die Spitze des Interaktionswerkzeugs ist virtuell repräsentiert und als Verlängerung des physischen Anteils im virtuellen Raum repräsentiert. Manipulationen des physischen Teils werden auf den virtuellen Teil übertragen (vgl. Abbildung 44). Es treten Probleme der Wahrnehmung der Schnittstelle zwischen physischem und virtuellem Anteil des Werkzeugs auf (Verdeckungen, Versatz der Bezugssysteme, Akkommodations-Konvergenz-Konflikt). Da die Darstellung der virtuellen Werkzeugspitze mit derselben Technologie wie die virtuellen Mediums erfolgt, ist diese optimal in das virtuelle Medium integriert (s. o.).

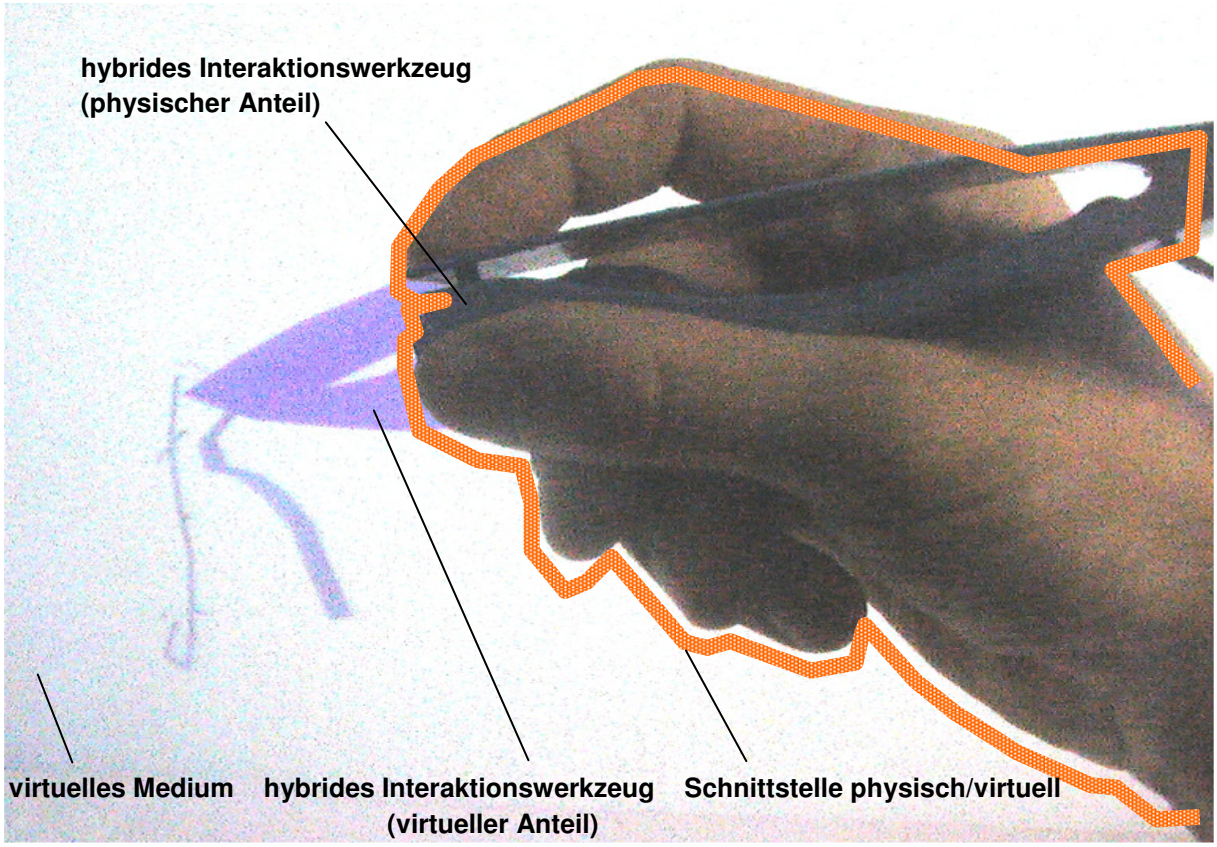


Abbildung 44: Interaktion mittels hybrider Objekte.

4.6 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden zunächst Aspekte der menschlichen Wahrnehmung und Motorik dargestellt, die für die Interaktion in virtuellen Räumen relevant sind. Anschließend wurden die Interaktionskonzepte Virtual Reality und Tangible User Interfaces diskutiert, die dem Benutzer virtuelle Umgebungen einerseits als hochflexibles Medium erschließen, ihm andererseits einen physischen Zugriff ermöglichen. Es wurde dargestellt, dass beide Konzepte in dieser Kombination besonderes Potenzial für die Realisierung flüssiger und kreativer Selbstkommunikationsprozesse mit vielen Freiheitsgraden aufweisen, und somit als probates Medium des Skizzierens eingesetzt werden können.

Unter Bezug auf psychische und physische Wahrnehmungsparameter konnten die Potenziale und Herausforderungen der Integration von Virtueller Realität und Tangible User Interfaces dargestellt werden. In Kapitel 6 werden dazu drei Hypothesen formuliert, die anschließend empirisch untersucht werden.

Um die Potenziale von Mixed Reality Umgebungen für kreative Entwurfsprozesse, insbesondere das immersive dreidimensionale Skizzieren, aus Sicht der avisierten Nutzer zu untersuchen, folgt im nächsten Kapitel eine qualitative Untersuchung der Benutzeranforderungen mittels zweier Expertendiskussionen in Form von Fokusgruppen.

5
Studie 1: Analyse der Benutzeranforderungen an immersives dreidimensionales Skizzieren – Ergebnisse einer Expertenbefragung

Welche Anforderungen stellen potenzielle Nutzer an dreidimensionale Skizziersysteme? In den vorangegangenen Kapiteln wurden Anforderungen aus produktentwicklungsmethodischer, psychologischer und technischer Sicht erarbeitet. Im Sinne eines benutzerorientierten Vorgehens (vgl. DIN EN ISO 13407, 2000: User Centered Design) soll die Anforderungsanalyse in diesem Kapitel nun mit einer empirischen Untersuchung der Benutzeranforderungen abgeschlossen werden.

Ziel der Untersuchung war es, entsprechend der ersten Forschungsfrage dieser Arbeit (Abschnitt 1.2, S. 8) die Potenziale und Grenzen des dreidimensionalen Skizzierens in immersiven VR-Umgebungen aus Sicht der potenziellen Nutzer und Experten zu explorieren, sowie Ideen und Gestaltungshinweise für Skizzierwerkzeuge zu generieren. Hierzu wurde ein qualitativer Forschungsansatz gewählt. Zunächst wurden fünf *Einzelinterviews* mit Experten und avisierten Nutzern geführt. Die daraus gewonnenen Ergebnisse flossen in die Gestaltung eines Fokusgruppenleitfadens ein, mit dessen Hilfe die angestellten Forschungsfragen gezielt adressiert und im Gruppenkontext untersucht werden sollten. Die Fokusgruppen wurden in Form von halbstrukturierten *Leitfadeninterviews* mit durchgehend offenen Fragen durchgeführt, die sich an der Beispieldomäne Möbeldesign orientierten. Diese Domäne wurde gewählt, da Produkte hier insbesondere über ihre Form und weniger über Funktions- und Wirkprinzipien beschrieben werden. Sie erschien daher auch für die Evaluation in der avisierten immersiven Virtual Reality Umgebung geeignet.

Als Ergebnis der Befragung konnten acht Funktionsgruppen für das dreidimensionale Skizzieren ermittelt werden: *klassische Zeichentechniken, klassische Modellierungstechniken, klassische CAD-Modellierung, neue 3D-Zeichentechniken, neue 3D-Modelliertechniken, Abstraktionstechniken, Dynamik* und *Umgebungsbedingungen*. Darüber hinaus ergaben sich konkrete Gestaltungsideen für 3D-Skizzierwerkzeuge. Auch potenzielle Grenzen des dreidimensionalen Skizzierens wurden von den Teilnehmern genannt, dazu gehören Probleme der Strichführung aufgrund des *fehlenden haptischen Widerstandes* und *Probleme, Ansatzpunkte im Raum präzise zu treffen*.

Ausgangspunkt für die vorzustellende Expertenbefragung ist die Darstellung bisheriger Studien im Bereich immersiven Skizzierens und Modellierens.

5.1 Benutzerzentrierte Anforderungsanalyse

Eine zentrale Aktivität im benutzerzentrierten Entwicklungsprozess bildet die Analyse der Benutzeranforderungen und der organisatorischen Anforderungen an ein Produkt oder System. Diese Anforderungen umfassen insbesondere folgende Aspekte (vgl. DIN EN ISO 13407, 2000):

- die funktionale Leistung des Systems,
- gesetzliche Anforderungen, Sicherheits- und Gesundheitsanforderungen,
- die Zusammenarbeit und Informationsaustausch zwischen den Beteiligten,
- die Arbeitsaufgaben der Beteiligten,
- die Ausführung der Aufgaben,
- die Gestaltung und Organisation der Arbeit, sowie
- die Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle und des Arbeitsplatzes.

Anforderungsanalysen sollten darüber hinaus *vollständig, korrekt* und *konsistent* sein sowie *klassifizierbare, verständliche* und *überprüfbare* Anforderungsbeschreibungen liefern (vgl. Rupp, 2006). Hierzu können in Abhängigkeit vom Charakter des Produkts oder Systems vielfältige Erhebungsmethoden angewendet werden, beispielsweise Interviewtechniken, Fokusgruppen, Beobachtungsmethoden oder Kreativitätstechniken.

5.2 Bisherige Untersuchungen

Die Benutzeranforderungen an immersive dreidimensionale Skizzier- bzw. Modelliersysteme sind bisher nur wenig empirisch erforscht worden. Zwar existieren bereits prototypische immersive Skizzier- und Modelliersysteme (Abschnitte 5.2.1, S. 108, bis 5.2.7, S. 121), deren Entwicklungsprozess kann jedoch als vorrangig technikgetrieben beschrieben werden. Einige der anhand dieser Prototypen bereits durchgeführten Studien geben dennoch wertvolle Hinweise auf benutzerseitige Anforderungen. Kritisch hervorzuheben sind deren teilweise mangelhafte Ausführungsmethodik und die häufig sehr geringe Teilnehmerzahl. Auch wurden häufig Künstler befragt, nur selten die im Produktentwicklungsprozess involvierten Designer und Konstrukteure.

5.2.1 Deisinger et al.

Deisinger (2002) entwickelte gemeinsam mit 22 Designern und Ingenieuren Anforderungen an immersive Modelliersysteme zur Unterstützung der konzeptionellen Formgestaltung. Die Anforderungen wurden in einem zweitägigen Workshop in zwei sogenannten „Brainwriting" Sitzungen[1] erarbeitet und gemeinsam diskutiert. Als generelle Anforderung wurde von den Teilnehmern formuliert, dass sie sich Unterstützung sowohl bei der *Erstellung und Manipulation* von Ideen und Formen, als auch bei deren *Präsentation* wünschten. Darüber hinaus wurden folgende Kriterien formuliert (a. a. O., S. 71):

- die „Bedienung" einfach und fehlertolerant zu realisieren,

[1] Brainwriting ist eine dem Brainstorming verwandte Kreativitätstechnik.

- die im Arbeitsprozess notwendigen Sprünge zwischen immersiven und herkömmlichen Medien komfortabel zu gestalten,
- mit Hilfe des Systems ein virtuelles Material zu erschaffen, dessen Eigenschaften herkömmlichen Materialien „überlegen und frei wählbar" sein sollten, sowie
- Möglichkeiten zur Animation und Simulation zu schaffen.

In einer anschließenden Evaluation untersuchten Deisinger et al. (2000; 2002) das Konzept des immersiven Modellierens in einer vergleichenden Studie dreier Modelliersysteme: eines immersiven Volumenmodellierers zum Auf- und Abtragen von Volumenpartikeln, eines immersiven, polygonbasierten Skizziersystems und eines CAD-ähnlichen Systems zur immersiven Erstellung und Manipulation von Freiformformflächen. An der Untersuchung nahmen 36 Designer und Ingenieure, sechs Frauen und 30 Männer teil, die in halbstrukturierten Interviews vor und nach der Modellieraufgabe befragt wurden. Die Befragungen ergaben, dass die Teilnehmer in

- der *Dreidimensionalität* des virtuellen Mediums und
- der Möglichkeit*, Modelle im Maßstab eins-zu-eins erstellen* zu können,

besondere Vorteile des immersiven Modellierens sehen (a. a. O., S. 74). Als Gestaltungskriterien wurden genannt:

- optimale visuelle Darstellung,
- großes Arbeitsvolumen,
- physische Unterstützung der Arme zur Unterstützung feinmotorischen Arbeitens,
- die Unterstützung „*natürlicher Verhaltensweisen*, *Intuitivität* und einfache *Erlernbarkeit*",
- Einführung von *Rastern und Referenzobjekten* im Projektionssystem zur Unterstützung von Orientierung und Größeneinschätzung,
- die Vermeidung von köpernahen technischen Hilfsmitteln wie Brillen, Kabeln und Eingabegeräten sowie
- ein durchgängiger Datenaustausch mit CAD-Programmen und Rapid Prototyping Verfahren..

Komplexe Modellierfunktionalitäten wurden dagegen nicht gewünscht. Die Teilnehmer regten weiterhin an, *spezifische Interaktionsgeräte* zu entwickeln, die auf den Anwendungsfall des immersiven Modellierens zugeschnitten sind.

In einer abschließenden Untersuchung eines immersiven Modelliersystems, welches Primitiven-, Flächen- und Volumenmodellierung vereint, nahmen sieben potenzielle Anwender teil. Die Untersuchung konnte die Ergebnisse der vorherigen Studien bestätigen. Die Teilnehmer wünschten sich bzw. vermissten:

- Funktionen zum Zeichnen von Linien und Kurven,
- Möglichkeiten, verschiedene Werkzeuge einzusetzen (beispielsweise Schleifpapier), und
- Möglichkeiten, Modellierschritte rückgängig zu machen (engl. *undo*; wurde von allen Teilnehmern gewünscht).

Zusätzlich wurden von den Teilnehmern mehrere mögliche Anwendungsfelder eines solchen Systems benannt (a. a. O. S. 145):

- „als Prozessschritt nach der Papier- und Bleistiftskizze“,
- „im Zwischenbereich Konstruktion/Design“ zur iterativen Veränderung von Formen und
- „als Präsentationswerkzeug mit der Möglichkeit der interaktiven Reflektion“.

Die empirischen Untersuchungen von Deisinger et al. und die daraus abgeleiteten Anforderungen stellen eine wichtige Grundlage weiterer Entwicklungen immersiver Modelliersysteme dar. Insbesondere heben sich die Studien durch die vergleichsweise hohe Zahl an Teilnehmern, deren industrienahen Hintergrund und die teilweise im Gruppenprozess erarbeiteten Anforderungen ab. Die in den Studien erstellten Modelle und Skizzen wurden von Deisinger et al. jedoch nicht untersucht. Auch verwendeten sie hinsichtlich der Erhebung der Gebrauchstauglichkeit der Systeme keine standardisierten Erhebungs- und Auswertungsmethoden, so dass die Ergebnisse nur bedingt aussagekräftig sind.

5.2.2 Keefe et al.

Ein VR-CAVE-basiertes System zum immersiven Erstellen dreidimensionaler Malereien wurde von Keefe et al. (2001) entwickelt und empirisch untersucht. Das System verfügt über die Möglichkeit, mittels eines physischen Pinsels (Prop) direkt in den virtuellen Raum zu zeichnen (vgl. Abbildung 45). Die Farbauswahl erfolgt über physische Farbpaletten. Die Strichstärke wird mittels eines Datenhandschuhs und einer Handgeste ausgewählt. Virtuelle Farben können mittels eines physischen Farbeimers in die virtuelle Szene „gekippt“ werden. Über ein virtuelles Kontrollelement ist es in diesem System möglich, den Entstehungsprozess der Szene nachträglich zu verfolgen, und sich auf einer Zeitachse vor- und zurück zu bewegen.



Abbildung 45: Immersives Skizziersystem CavePainting (aus Keefe et al., 2001, S. 88).

Die empirische Untersuchung erfolgte in Form einer Studie, an der Kunststudenten und bildende Künstler teilnahmen. Die Studie erfolgte in Form von Beobachtungen von Anwendern des Sys-

tems, genaue Angaben über die Erhebungs- und Auswertungsmethoden werden jedoch nicht gemacht. Die Teilnehmer äußerten Gefallen an der Form des interaktiven Zeichnens. Insbesondere:

- die Begehbarkeit der Modelle und
- die Einbeziehung des Körpers durch Körperbewegungen

wurden positiv hervorgehoben. Problematisch erschienen den Teilnehmern:

- das Zeichnen von Details; hier behalfen sich die Teilnehmer jedoch damit, dass sie die Szene vergrößerten (skalierten), um Details zu zeichnen, und
- das Entfernen von „virtueller" Farbe; dies war zwar durch ein sequentielles Rückgängigmachen (engl. *undo*) möglich, entsprach aber nicht den Erwartungen der Benutzer.

Der Gebrauch der Interaktionsobjekte (Pinsel und Farbpalette; Props) fiel insbesondere jungen Künstlern leicht, die deren Funktion unmittelbar verstanden. Keefe et al. (2001) entschieden sich daher, möglichst viele Funktionen über Props zu steuern, die auf einem physischen Tisch in der CAVE angebracht waren. Weitere häufig genutzte Funktionen wurden durch Handgesten mittels eines Datenhandschuhs gesteuert.

Um die Präzision und den Detailreichtum dreidimensionaler Zeichnungen zu verbessern, entwickelten Keefe et al. (2007) Interaktionstechniken, die ein- und zweihändiges linienbasiertes Zeichnen mittels eines Desktop-VR-Systems und eines Stift-basierten Force-Feedback-Geräts ermöglichen.

In der einhändigen Variante („drag") wird der virtuelle Pinsel (die virtuelle Linie) in einem definierten Abstand von 0,5 bis 4,5 cm hinter dem physischen Stift platziert und von diesem gezogen (engl. *towed*, Abbildung 46 a, b). Innerhalb des definierten Radius kann der Stift frei bewegt werden, ohne eine Zeichenspur zu hinterlassen (vgl. Abbildung 46 c). Erst wenn der Stift aus diesem Radius herausgeführt wird, werden neue Strichelemente erzeugt (vgl. Abbildung 46 d). Segmente der gezeichneten Linie können gelöscht werden, indem der Pinsel auf der Linienbahn zurückgeführt wird (vgl. Abbildung 46 e-h). Das Force-Feedback-Gerät unterstützt den Benutzer dabei, während des Neuzeichnens tangential zur bestehenden Linie zu verbleiben. Ein elastisches am Stift angebrachtes Kontrollelement ermöglicht die Variation der Linienstärke.

In der zweihändigen Variante („tape") wird der Stift von der nicht dominierenden Hand geführt, während die dominierende Hand die Richtung der Linienführung vorgibt (vgl. Abbildung 47 a). Haptische Führungskräfte, vermittelt über das Force-Feedback-Gerät, helfen dem Benutzer, während des Zeichnens der Linien auf der Tangente zwischen Stift- und Handposition zu verbleiben (vgl. Abbildung 47 b-e). In beiden Varianten „drag" und „tape" werden die Stiftbewegungen durch leichte Reibungs- und Viskositätsmomente verlangsamt, die über das Force-Feedback-Gerät aufgebracht werden.

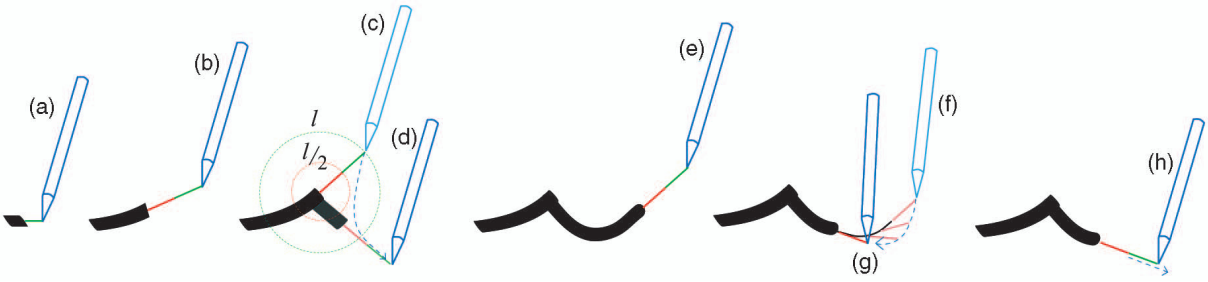


Abbildung 46: Immersive Skizziertechnik „drag“ (aus Keefe et al., 2007, S. 1070).

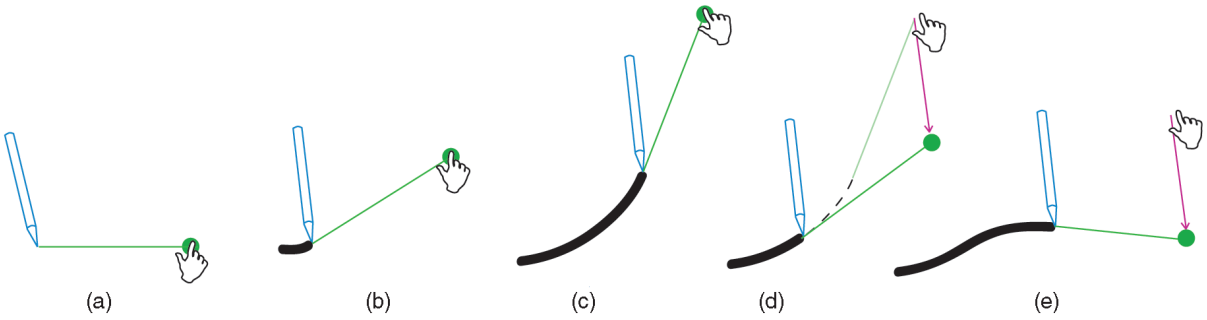


Abbildung 47: Immersive Skizziertechnik „tape“ (aus Keefe et al., 2007, S. 1071).

Für eine vergleichende Untersuchung dieser Interaktionstechniken wurden zusätzlich zwei weitere Interaktionstechniken eingeführt (vgl. Tabelle 4). Beide erlauben freies unverzögertes Zeichnen im Raum, wobei in einer Variante die Reibungs- und Viskositätsmomente beibehalten wurden („sand“), in der anderen fehlten auch diese („free“).

Die Studie umfasste zwölf erfahrene Künstler, die verschiedene Aufgaben zu lösen hatten, bei denen mittels der vier Interaktionstechniken Linienverläufe nachzuzeichnen waren. Als abhängige Variablen der Studie wurden Positions- und Richtungsabweichungen der gezeichneten Linie im Vergleich zur vorgegebenen Ideallinie (Fehler) und die Zeit zur Lösung der Aufgabe ermittelt. Unabhängige Variablen waren die vier Interaktionstechniken. Alle Teilnehmer mussten sämtliche Aufgaben mit allen Interaktiontechniken lösen, die Ausführungsreihenfolge wurde variiert und entsprach einem lateinischen Quadrat.

Tabelle 4: Immersive Skizziertechniken der Untersuchungen von Keefe et al. (2007).

Skizziertechnik	Beschreibung
drag	- einhändige Interaktionstechnik
	- der physische Stift „zieht" die virtuelle Linie in einem definierten Abstand; innerhalb des Abstandes können leicht Korrekturen ausgeführt werden
	- haptische Führung: leichte Reibungs- und Viskositätsmomente am Stift
tape	- zweihändige Interaktionstechnik
	- die dominierende Hand bestimmt die Richtung der Strichführung
	- haptische Führung: leichte Reibungs- und Viskositätsmomente am Stift; Stift wird auf der Tangente geführt
sand	- einhändige Interaktionstechnik
	- direkte Umsetzung der Stiftbewegungen in virtuelle Linien
	- haptische Führung: leichte Reibungs- und Viskositätsmomente am Stift
free	- einhändige Interaktionstechnik
	- direkte Umsetzung der Stiftbewegungen in virtuelle Linien
	- keine haptische Führung

Die Auswertung der Studie ermittelte signifikante Unterschiede für alle Positions- und Richtungsabweichungen und für die Ausführungszeit zwischen den vier Versuchsbedingungen. In der einhändigen Variante „drag" (M_{drag}=1,45 mm) waren die Positionsabweichungen am geringsten, gefolgt von der zweihändigen Variante „tape" (M_{tape}=1,81 mm) und den zwei zusätzlichen Kontrollvarianten „sand" und „free" (M_{sand}=2,37 mm; M_{free}=2,68 mm). Die Richtungsabweichungen waren in der ein- und zweihändigen Variante auf annähernd gleichem Niveau (M_{drag}=7,37 °; M_{tape}=7,38 °) und weniger als halb so groß wie die Abweichungen in den Kontrollvarianten (M_{sand}=18,01 °; M_{free}=19,25 °). Ein inverses Bild ergibt sich bei der Betrachtung der Ausführungszeiten. Die Teilnehmer benötigten in den ein- und zweihändigen Varianten wesentlich länger als in den Kontrollvarianten (M_{drag}=23,88 s; M_{tape}=19,89 s; M_{sand}=13,57 s; M_{free}=12,75 s). In einer Nachbefragung gaben die Teilnehmer an, die zweihändige Interaktionsvariante gegenüber der einhändigen als besser kontrollierbar zu empfinden.

Die Ergebnisse der Studie verdeutlichen, dass durch die Ergänzung der Interaktionstechniken um zusätzliche Steuerungsmechanismen vergleichsweise genaues immersives Zeichnen ermöglicht werden kann. Andererseits wird durch den erhöhten Steuerungs- und Koordinierungsaufwand auch der zeitliche Aufwand erhöht. Die Ergebnisse legen hinsichtlich der Anwendung in der Produktentwicklung eine Abwägung zwischen geringer Ausführungsgeschwindigkeit und Detailreichtum nahe, wobei ersteres in frühen, konzeptionellen Phasen und letzteres in späteren detaillierenden und ausarbeitenden Phasen angemessen erscheint.

Interessant an Keefes Studie ist weiterhin, dass durch ein Abbremsen der Zeichenbewegung (Reibung und Viskosität) gegenüber einer gänzlich freien Zeichenbewegung lediglich geringe

Vorteile in der Positionierungsgenauigkeit erzielt werden können (ca. 13 Prozent), sich hinsichtlich der Richtungsabweichung und Ausführungsdauer aber keine wesentlichen Vorteile ergeben. Die Hypothese, dass haptisches Feedback das freihändige immersive Skizzieren wesentlich unterstützen kann, muss durch diese Ergebnisse in Frage gestellt werden.

Die Studien von Keefe et al. (2007) haben grundlegende Erkenntnisse hinsichtlich der Anreicherung der Interaktionstechniken um zusätzliche Steuerelemente und um haptisches Feedback geliefert, die wesentlichen Einfluss auf das dreidimensionale Zeichnen haben. Da hier jedoch keine immersive Umgebung, sondern ein Desktop-VR-System zum Einsatz kam und die Teilnehmer der Studie ausschließlich Künstler waren, bleibt die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf immersives Skizzieren in der Produktentwicklung zu überprüfen. Es ist weiterhin nicht ersichtlich, ob in der Auswertung der Ergebnisse der Einfluss der Aufgabenreihenfolge und eine Interaktion mit der Bedingung Interaktionstechnik überprüft wurden.

5.2.3 Mäkäla et al.

Mäkäla et al. (2002) untersuchten die Gebrauchstauglichkeit und das Benutzererleben in einem VR-CAVE-basierten immersiven dreidimensionalen Skizziersystem. Das System ermöglichte es, mittels eines Stiftes frei im Raum Striche unterschiedlicher Farbe zu zeichnen. An der Untersuchung nahmen zehn Teilnehmer im Alter von 28 bis 60 Jahren teil, deren Berufserfahrung zwischen zwei und 30 Jahre betrug. Die Untersuchung erstreckte sich über zwei Tage. Nach einer Lernphase wurde den Teilnehmern die Aufgabe gestellt, ein Selbstportrait zu zeichnen. Am zweiten Tag konnten sie frei mit dem System arbeiten. Nach der Erstellung des Selbstportraits und nach der freien Arbeit beantworteten die Teilnehmer einen Fragebogen mit 22 Fragen.

Die Befragung verdeutlichte mehrere ergonomische Probleme. Es wurden insbesondere die zeitliche Verzögerung zwischen Handbewegung und Darstellung der Striche sowie die Ungenauigkeit des verwendeten Trackingsystems (hier magnetisches Tracking) benannt. Allerdings entwickelten die Teilnehmer Kompensationsstrategien. Um der Verzögerung entgegenzuwirken, verlangsamten die Teilnehmer ihre Zeichenbewegungen. Um die Ungenauigkeit auszugleichen, wiederholten sie ein und dieselbe Zeichenbewegung bis sie die gewünschte Form erzielten oder sie eine andere Lösung gefunden hatten.

Die meisten Teilnehmer skizzierten improvisierend, nur wenige erstellten bildhafte Darstellungen. Viele der Teilnehmer wünschten sich die Möglichkeit, die Strichstärke variieren zu können. Einige Teilnehmer setzten verschiedene Farbtöne ein, um Oberflächeneigenschaften zu simulieren.

Die geringe Teilnehmerzahl (zehn), unklare Befragungs- und Auswertungsmethoden, das Fehlen einer Anforderungsanalyse *vor* der Erstellung des Prototypen sowie die Einschränkung der Teilnehmer auf Künstler verringern die Validität und Übertragbarkeit der Aussagen dieser Studie auf Anwendungen in der Produktentwicklung.

5.2.4 Hacker, Römer, Schütze et al.

In Untersuchungen mit 61 berufserfahrenen Konstrukteuren und Maschinenbaustudenten konnte Römer (2002) die Bedeutung von Skizzen als externem Hilfsmittel in den frühen Entwicklungsphasen untermauern (Abschnitt 2.1.1, S. 16). Nahezu alle Untersuchungsteilnehmer erstellten während der Problemlösung – hier zwei vergleichsweise aufwändige und praxisnahe

Konstruktionsaufgaben – in großem Umfang Skizzen, jedoch kaum physische Modelle. CAD-Systeme wurden von der Mehrheit der Probanden nicht vermisst.

In vergleichenden Studien mit 66 Studenten einer Fakultät des Maschinenwesens untersuchte Schütze (2003) die Eignung von Papier und Bleistift, Stift-basierten digitalen 2D-Grafiktabletts und 2D-CAD-Software als externen Hilfsmitteln in frühen Produktentwicklungsphasen. In Schützes Studien zeigte sich eine signifikante Überlegenheit von Papier und Bleistift hinsichtlich der Lösungsgüte sowohl gegenüber 2D-Grafiktabletts als auch gegenüber 2D-CAD-Software. Schütze führt den überraschenden Unterschied zwischen der Papier- und Bleistiftvariante und dem 2D-Grafiktablett auf „Veränderungen von Routinen der taktil-kinästhetischen Bewegungssteuerung und eine Verzögerung zwischen Sensumotorik und visueller Rückmeldung“ zurück, die durch die technische Realisierung des Grafiktabletts bedingt sind (a. a. O., S. 207).

Aufbauend auf den Ergebnissen ihrer empirischen Studien formulieren Römer und Schütze ähnliche Anforderungen an zukünftige digitale Unterstützungssysteme des Entwurfsprozesses (Römer, 2002, S. 122ff; Schütze, 2003, S. 214ff):

- „Der *Handlungsraum* (= Eingabemedium, bislang häufig Mouse-Pad und Tastatur) und der *Wahrnehmungs- bzw. Darstellungsraum* (= Ausgabemedium, bislang der Bildschirm)“ sollten *eine Einheit bilden*, um ein „unmittelbares Vorgehen, (...) also eine zeitliche und logische Übereinstimmung des Entwurfs einer Lösungsidee im Kopf mit dem Blick auf das Papier und der Bewegung der Hand“ zu ermöglichen (Römer, 2002, S. 122; vgl. Schütze, 2003, S. 215).
- Es sollten *verschiedene Strichstärken und Farben* wählbar sein, um bestimmte Elemente unterschiedlich stark zu betonen; ratsam wäre hierzu eine motorische Steuerung beispielsweise durch Anpressdruck eines Interaktionselements (Römer, 2002, S. 122; vgl. Schütze, 2003, S. 215)
- Benutzer sollten eine große *Flexibilität* beim Skizzieren erhalten, um Einfälle spontan umsetzen zu können oder auf Fehler zu reagieren; dazu ist es beispielsweise nötig, „eine Linie nicht – wie in sogenannten ‚Sketcher’-Funktionen konventioneller CAD-Systeme üblich – anhand der Angabe des Anfangs- und Endpunktes anzugeben, sondern die einzelnen Punkte der Linie kontinuierlich durch die Bewegung des Eingabewerkzeugs zu definieren“ (Römer, 2002, S. 122; vgl. Schütze, 2003, S. 215).
- Gegenständliche CAD-Modelle, die sowohl ein „manuell bearbeitbares materielles Modell als auch (...) dessen CAD-Daten“ zur Manipulation bereitstellen, sollten eingesetzt werden (Römer, 2002, S. 125; vgl. u. a. Sachse, 2002).
- Die Systeme sollten die *rasche* Erstellung unspezifischer Formen zulassen, da Entwurfsdarstellungen in frühen Entwicklungsphasen unkonkret und unvollständig sind (Schütze, 2003, S. 214).
- Bildhafte und symbolische Repräsentationsformen sollten flexibel zu integrieren sein (Schütze, 2003, S. 215).
- Der Entwerfende sollte während der kreativen Arbeit die erstellten Skizzen *im Zusammenhang* und *in unterschiedlichen Konkretisierungsgraden betrachten* können (Schütze, 2003, S. 216).

- *Kollaboratives Arbeiten*, ggf. über verschiedene Standorte hinweg, sollte durch Unterstützungssysteme ermöglicht werden (Schütze, 2003, S. 215).

Dem Einsatz von Virtual Reality als immersives, digitales Medium spricht Römer großes Potenzial zu. „Mit Hilfe dieser Technologie wäre ein dreidimensionales Skizzieren vorstellbar, mit dessen Hilfe wichtige Eigenschaften der klassischen Freihandskizze erhalten bleiben könnten (...) Hier deutet sich die Entstehung eines völlig neuen computergestützten Mediums an, dessen Eigenschaften und Möglichkeiten bislang nur erahnt werden können und für das sich weitere interessante Forschungsfelder ergeben." (Römer, 2002, S. 125) Als Forschungsfragen des immersiven dreidimensionalen Skizzierens formuliert Römer:

- „Auf welche Weise (kann) die Wahl der Strichdicke intuitiv und verzögerungsfrei erfolgen?" (Römer, 2002, S. 126; vgl. Schütze, 2003, S. 215)
- „Wie (kann) ein fließender Übergang von einer abstrakten Liniendarstellung im Raum zur Definition von Flächen und Körpern erfolgen?" (Römer, 2002, S. 126)
- „Wie (bewältigen) Konstrukteure diese neue Art eines dreidimensionalen virtuellen Skizzierens?" (Römer, 2002, S. 126)
- Können Konstrukteure „grundsätzliche Vorteile für den konstruktiven Entwurfsprozess feststellen?" (Römer, 2002, S. 126)

Die Arbeiten von Römer und Schütze sind methodisch präzise und eröffnen aus der Perspektive des zweidimensionalen Skizzierens wichtige Forschungsfragen und Gestaltungshinweise für immersive dreidimensionale Skizziersysteme.

5.2.5 Lindemann, Müller, Pache et al.

Basierend auf theoretischen Betrachtungen (vgl. Pache & Lindemann, 2003; Lindemann et al., 2002) und empirischen Studien (vgl. Pache, 2005) des zweidimensionalen Skizzierens formulieren Pache und Lindemann verschiedene Anforderungen an einen immersiven „3D-Skizierer":

- es sollte möglich sein, *Formen, Wörter und Symbole* zu erzeugen und in eine räumliche Beziehung zu bringen,
- sowohl *technische Komponenten* als auch *Prozesse* sollten darstellbar sein,
- geometrische Formen sollten durch Symbole *semantisch angereichert* werden können (beispielsweise durch Pfeile),
- es sollte möglich sein, *mehrdeutige Formen* zu erstellen, die sich als mehrere konkrete Formen interpretieren lassen,
- neue Systeme sollten die *„Papier- und Bleistift"-Metapher* so gut wie möglich nachbilden.

Abgeleitet aus Erfahrungen mit CAD-basierten virtuellen Produktentstehungsprozessen stellen Pache und Lindemann die folgenden Anforderungen an immersive Skizziersysteme:

- Da im Produktentwicklungsprozess typischerweise räumliche Objekte erschaffen werden, sollten Skizzierwerkzeuge auch *die Erstellung räumlicher Objekte* unterstützen.
- Skizziersysteme sollten digitale Daten erzeugen, die sich *in digitale Produktdatenmanagementsysteme integrieren* lassen.

- Alle *CAD-typischen Manipulationsoperationen* wie Rotieren, Verschieben und Skalieren sollten auch mit digitalen Skizzen und Skizzenteilen möglich sein.

Anhand eines prototypisch realisierten immersiven dreidimensionalen Skizziersystems können Pache (2005) und Müller (2007) Erkenntnisse und zukünftige Anforderungen an immersive Skizziersysteme ableiten. Pache (2005) schlägt aufgrund eigener Erfahrungen mit dem Prototypen folgende Veränderungen vor:

- Die Intensität und/oder Linienstärke der Skizzen über eine Andrucksstärke mittels eines *drucksensitiven Druckknopfes* am Zeichenstift zu realisieren,
- Mittels Force-Feedback-Geräten, die auf den Zeichenstift wirken,
    - *virtuelle Zeichenflächen* haptisch zu simulieren (virtuelle 2D-Boards),
    - *virtuelle 3D-Objekte* darzustellen, deren Oberflächen undurchdringlich sind; diese Oberflächen könnten dann als Skizzierflächen dienen,
    - den Stift automatisch an den Linienenden einrasten zu lassen, um das Wiederfinden von Ansatzpunkten zu erleichtern („*Snap-Funktion*“).
- Beidhändiges *gestenbasiertes Skizzieren* zu realisieren, einschließlich Gesten für das Zeichnen, Skalieren und Bewegen, letzteres insbesondere mit der nicht dominierenden Hand,
- *den Arbeitsraum zu vergrößern*, beispielsweise durch den Einsatz von VR-CAVE-Umgebungen.

Müller (2007) nutzte den Prototypen, um empirische Untersuchungen des immersiven dreidimensionalen Skizzierens durchzuführen. Er gab diesen den Charakter von Fallstudien, da der noch prototypische Entwicklungsstand keine tiefer gehende vergleichende Untersuchung des Werkzeugs zuließ. Dem entsprechend verzichtete Müller auch auf statistisch abgesicherte Auswertungsmethoden. An den Untersuchungen nahmen zehn Studenten einer Fakultät für Maschinenwesen teil. Ihnen wurden die zwei Aufgaben gestellt, einen Schlitten und ein Cocktailglas samt Dekoration zu zeichnen. Je eine Aufgabe musste mit Papier und Bleistift, die andere mit dem 3D-Skizzierer gezeichnet werden. Die Teilnehmer wurden in zwei Gruppen á fünf Personen geteilt. Nach einer Einführung in die Funktionen des 3D-Skizzieres lösten die Teilnehmer die Aufgaben je nach Gruppenzugehörigkeit in verschiedener Reihenfolge. Die Teilnehmer wurden per Videokamera aufgezeichnet. Am Ende der Studie erfolgte eine Befragung mittels eines Fragebogens. Eine Analyse der zeitlichen Anteile der Tätigkeiten ergab nach Müller in der 2D-Aufgabe folgende Aufteilung: 55 % Zeichnen, 36 % Denken, 8 % Radieren, 1 % Translation. Die Bearbeitungszeit der 3D-Aufgabe lag zwischen dem 1,6- und 2,2-fachen der 2D-Papier- und Bleistiftaufgabe. Die zeitlichen Anteile der Tätigkeiten lagen hier folgendermaßen: 34 % Zeichnen, 33 % Rotation, 16 % Denken, 15 % Zoom und 2 % Translation. In der 3D-Bedingung konnten die Teilnehmer das erstellte Modell rotieren lassen, verschieben und skalieren. Hierin sieht Müller sowohl einen Vorteil gegenüber der 2D-Bedingung als auch den Grund für die Unterschiede in der zeitlichen Aufteilung der Tätigkeiten. Weitere Stärken des 3D-Skizzierers wurden von Benutzern in den Interviews geäußert (Müller, 2007, S. 72):

- „Direktes Skizzieren in 3D, dadurch keine Notwendigkeit, in Schnitte oder perspektivische Darstellungen umcodieren zu müssen“ (sechs Nennungen),

- „Möglichkeit, die Skizze im Raum zu drehen, dadurch keine Notwendigkeit des Skizzierens weiterer ‚Ansichten'" (vier Nennungen),
- „Schnelleres Verständnis komplexer dreidimensionaler Objekte" (drei Nennungen),
- „Intuitive Bedienung" im Vergleich zu herkömmlichen CAD-Werkzeugen (drei Nennungen).

Die Teilnehmer benannten in den Interviews ebenfalls empfundene Nachteile des immersiven Skizziersystems hinsichtlich fehlender notwendiger Funktionen (Müller, 2007, S. 73f):

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

Während der Beobachtung der Versuche stießen die Versuchsleiter auf weitere Defizite des immersiven 3D-Skizzierers:

- das „Fehlen einer Rückgängig-Funktion",
- keine Einbeziehung der Kopfposition in die Berechnung der Darstellung; die Teilnehmer der Studie versuchten, eine andere Perspektive auf das 3D-Objekt zu gewinnen, welche mit dem Prototypen aufgrund des deaktivierten Headtrackings jedoch nicht möglich war,
- Schwierigkeiten beim linienbasierten Skizzieren von Körpern mit gekrümmten Oberflächen (s. u.)

Hinsichtlich der technischen Ausrüstung wurden ebenfalls Nachteile genannt:

- ein „sehr kleiner Arbeitsraum" (drei Nennungen),[1]
- „ungeeignet für detaillierte Skizzen" (zwei Nennungen),
- „anstrengende Stereo-Visualisierung" (eine Nennungen; im Versuch wurde ein Aktiv-Stereo-Verfahren eingesetzt).

Aufgrund der Beobachtungsergebnisse stellt Müller folgende Vor- und Nachteile des rein linienbasierten Skizzierens in den Vordergrund (a. a. O., S. 75f):

- linienbasierte Objekte müssen nicht nur aus einer Perspektive, wie beim 2D-Skizzieren, sondern aus mehreren Perspektiven als 3D-Modell erkennbar sein. Da beim linienbasierten Ansatz auch Linien der Objektrückseite sichtbar sind, die eigentlich verdeckt wären, werden hier zusätzliche Transformationsleistungen vom Benutzer erfordert.

---

[1] Der Arbeitsraum im Versuch entsprach einem Quader mit 15 cm Kantenlänge, dies entspricht 225 cm^2 Grundfläche; vgl. Fläche eines A4 Blattes: 623,7 cm^2.

- Vorteile kommen vor allem bei „kantigen Objekten“ zur Geltung.
- Je größer der Anteil an „gekrümmten Flächen“ ist, desto aufwändiger ist das Skizzieren mittels 3D-Linien. Benutzer müssen hier eigene Vorgehensweisen entwickeln (beispielsweise Kegelstümpfe mittels Spiralen, konzentrischen Kreisen oder Mantellinien darzustellen.)

Obwohl Müller als einer der Ersten vergleichende Studien zum immersiven dreidimensionalen Skizzieren durchgeführt und daraus wichtige Anhaltspunkte für die Weiterentwicklung abgeleitet hat, sind die Ergebnisse aufgrund methodischer Mängel nur begrenzt verallgemeinerbar und aussagekräftig. So sind die Items des eingesetzten Fragebogens beispielsweise nur vierfach gestuft und teilweise missverständlich (beispielsweise „superschwer“, „schwer“, „leicht“, „superleicht“). Auch wird keine Erläuterung der Auswertungsmethoden gegeben. Die geringe Teilnehmerzahl von zehn Studenten mindert ebenfalls die Generalisierbarkeit der Ergebnisse.

Als Verbesserungsvorschläge schlägt Müller (2007) in Übereinstimmung mit Pache (2005) die Integration eines Headtrackingverfahrens sowie die Vergrößerung des Arbeitsraumes vor. Abweichend von Pache (2005), der eine starke Anlehnung an die Papier-und-Bleistift Metapher vorschlug, empfiehlt Müller, alternative neue Flächen- und Volumenmodellierungsmethoden zu entwickeln, insbesondere zur Modellierung nicht linienbasierter Modelle.

5.2.6 Fiorentino, Fleisch, Stork et al.

Das Skizziersystem von Fiorentino, Fleisch, Stork et al. (vgl. Fiorentino et al., 2002a; Fleisch et al., 2004; De Amicis et al., 2004) ermöglicht in der semi-immersiven Umgebung einer tischbasierten VR-Workbench mittels physischer Werkzeuge (Props), Linien und Freiformflächen zu erzeugen, sowie diese durch Überzeichnen zu korrigieren (vgl. Abbildung 48). Das System verwendet als Eingabegeräte einen drahtlosen Stift, eine transparente Plexiglasfläche, auf welche Menüs zur Systemsteuerung projiziert werden, sowie einen Würfel zur Navigation in der virtuellen Szene. Gezeichnet werden kann direkt auf der Oberfläche des Tisches, wobei die Zeichnung auf eine frei im Raum positionierbare virtuelle Fläche übertragen wird. Die Position dieser Fläche wird durch ein weiteres Interaktionsgerät, eine frei bewegbare transparente Scheibe („tangible plane“), bestimmt. Außerdem verfügt das System über ein Interaktionsgerät, welches am Zeigefinger der nicht dominierenden Hand angebracht werden kann. Gemeinsam mit dem Stift kann dieses genutzt werden, um virtuelle Klebebänder anzubringen; eine Methode, die insbesondere beim Entwerfen von Fahrzeugen eingesetzt wird (Virtual tape drawing, Anhang 12.1, S. 274).

Das System wurde in verschiedenen Ausbaustufen evaluiert. An einer ersten Studie nahmen 20 professionelle Designer und Konstrukteure aus dem Bereich Automobilbau und -design, Produktdesigner und Medienkünstler teil. Die Teilnehmer hatten nach einer Einarbeitungsphase zwei Stunden Zeit, um mit dem System zu skizzieren. Am zweiten Versuch nahmen nur drei Designer teil, denen je zwei Tage Zeit gegeben wurde, das System zu testen.

Positive Bewertungen erhielt das System für die Einfachheit, mit der es möglich ist, Flächen zu erzeugen, ohne diese mathematisch beschreiben zu müssen. Auch der mittels dieses Systems potenziell durchgängig digitale Modellierprozess vom Konzept zum Endmodell wurde begrüßt. Die Kombination von realen und virtuellen Elementen nahmen die Probanden als effektiv wahr (vgl. Fiorentino et al., 2002a).



Abbildung 48: Immersives Skizziersystem SpaceDesign (aus Fiorentino et al., 2002b, S. 477, 480).

In der zweiten, mehrtägigen Studie bemerkten die Teilnehmer, dass Sie sich ein solches immersives Modelliersystem nur als Ergänzung ihrer bisherigen Arbeitsumgebung vorstellen könnten. Auch konnten die Teilnehmer nur zwei Stunden am Stück mit dem System arbeiten, da die Belastung durch die stehende Arbeitshaltung und die Projektionstechnik als anstrengend empfunden wurde. Die Teilnehmer waren in der Lage, ihre Intentionen und Ideen darzustellen, Detailausarbeitungen gelangen jedoch nicht.

Fleisch et al. (2004) beobachteten und benannten drei Anwendertypen:

- Junior Autodesigner: Diese sind mit CAS-Software vertraut und erwarten ähnliche Funktionen und Präzision auch von immersiven Modellieranwendungen; sie präferieren daher das präzise Zeichnen auf Flächen statt das freie Zeichnen im Raum. Das immersive Medium wird von dieser Gruppe insbesondere für das unmittelbare visuelle Feedback geschätzt.
- Senior Autodesigner: Diesen sind Papier und Bleistift äußerst vertraut, das Arbeiten mit CAS-Software beschränkt sich auf 2D-Ansichten. Daher sind Flächen und 2D-Modi für diese Gruppe auch im immersiven Modellieren besonders wichtig. Teilnehmer aus dieser Gruppe sind insbesondere durch das Headtracking des VR-Systems irritiert und dadurch, dass der reale, physische Stift und der virtuelle Stift keine räumliche Einheit bilden, sondern dem Betrachter leicht versetzt erschienen (Abschnitt 4.4.1, S. 85).
- Medienkünstler und Bildende Künstler: Teilnehmer aus dieser Gruppe sind es gewohnt, frei zu zeichnen. Obwohl sie es gewohnt sind, zweidimensional zu arbeiten, gelingt es dieser Gruppe am besten, im Raum zu skizzieren.

Das semi-immersive Modelliersystem von Fiorentino et al. (vgl. Fiorentino et al., 2002a) bietet ein umfangreiches Repertoire an skizzenhaften Modelliertechniken samt physischen Interaktionsgeräten. Die mit diesem System zu erstellenden Modelle lassen einen industriellen Einsatz des immersiven Skizzierens und Modellierens möglich und sinnvoll erscheinen. Da ihr methodisches Vorgehen bei der Ausführung der Benutzerstudien nicht dokumentiert wurde, bleibt die Verallgemeinerbarkeit ihrer Ergebnisse zu überprüfen.

5.2.7 Krause, Lüddemann, Biahmou Tchebetchou et al.

Die Methoden der skizzierenden Formgestaltung nach Krause, Lüddemann, Biahmou Tchebetchou et al. (vgl. u. a. Krause & Lüddemann, 1996; Lüddemann, 1996; Biahmou Tchebetchou, 2005) ähneln den gestaltenden Tätigkeiten des konventionellen Modellbaus (virtuelle Tonmodellierung, engl. *virtual clay modeling, VCM*). Das erstellte Modell ist hier keine Strichskizze, sondern ein volumenbasiertes dreidimensionales virtuelles Tonmodell, welches mittels Interaktionstechniken, rechnerinternen Modellbauwerkzeugen und rechnerinternem Modellbaumaterial frei geformt werden kann. Die Werkzeugformen orientieren sich an ursprünglichen Techniken des Modellbaus wie Spachteln, Schablonen und Profilen, da angenommen wird, dass „hierdurch auch rechnerunterstützt eine schnelle und im Formverlauf geeignete Approximation von Freiformkörpern“ erzielt werden kann (Lüddemann, 1996, S. 48). Durch die Definition von Werkzeugformen und durch interaktive Bewegungsführung können Anwender auftragende, abtragende und ausgleichende Modellieroperationen ausführen. Als Interaktionsplattform dient eine VR-Holobench, eine semi-immersive VR-Umgebung. Die interaktive Bewegungsführung kann mittels eines physischen Interaktionsgeräts (Prop) durch den Benutzer beidhändig gesteuert werden (vgl. Abbildung 49), die Wahl der Werkzeugform ist über eine grafische Oberfläche möglich.



Abbildung 49: Interaktion mit einem virtuellen Tonmodell (aus Biahmou Tchebetchou, 2005, S. 104).

In einer empirischen Studie, an der sieben Studenten teilnahmen, untersuchte Biahmou Tchebetchou (2005) die Gebrauchstauglichkeit der Interaktionstechniken der virtuellen Tonmodellierung. Die Teilnehmer der Studie konnten das System in freier Entscheidung und ohne spezifische Aufgaben testen. Die Gebrauchstauglichkeit wurde mittels eines Fragebogens erhoben. Im Ergebnis zeigte sich eine hohe Konformität der erzielten visuellen Ergebnisse mit den durch die Benutzer ausgewählten Werkzeugformen. Auch wurde eine hohe Ähnlichkeit des realen Prozesses mit dem im System realisierten virtuellen Modellierprozess durch die Teilnehmer bestätigt. Die Verallgemeinerbarkeit der Ergebnisse wurde jedoch durch die geringen Vorkenntnisse der studentischen Teilnehmer im Bereich CAS und durch die geringe Teilnehmerzahl abgeschwächt.

Die virtuelle Tonmodellierung nach Krause, Lüddemann, Biahmou Tchebetchou et al. stellt als leicht und schnell zu gebrauchende skizzenhafte Modellierungstechnik eine bedeutende, volumenorientierte Alternative des immersiven, linienbasierten Skizzierens dar. Eine Integration beider Methoden erscheint vorteilhaft.

Bisherige Studien des immersiven dreidimensionalen Skizzierens und Modellierens lassen sich wie folgt zusammenfassen *(Kriterien, die im weiteren Verlauf dieser Arbeit untersucht werden, wurden kursiv hervorgehoben):*

- Als primäre Vorteile des immersiven dreidimensionalen Skizzierens und Modellierens wurden in den Studien ermittelt:
  - die *Dreidimensionalität*, d. h. das direkte Arbeiten im dreidimensionalen Raum, diese:
    - entspricht der Dreidimensionalität der entworfenen Produkte
    - vermindert die Notwendigkeit, Schnitte oder perspektivische Darstellungen erstellen zu müssen
    - erleichtert die Entwicklung einer räumlichen Vorstellung des Produkts
  - die Möglichkeit des Skizzierens und Modellierens im *Maßstab „eins-zu-eins"*
  - die Möglichkeit ein virtuelles Material zu erschaffen, dessen Eigenschaften herkömmlichen Materialien überlegenen sein könnten
  - die *Begehbarkeit* der Modelle
  - die *Einbeziehung des Körpers* durch Körperbewegungen während des Modellierens
  - die „intuitive" Benutzung im Vergleich zu herkömmlichen CAD-Werkzeugen
  - die potenzielle Vermeidung von Medienbrüchen.

▷ Kriterien, die an immersive Systeme zum Skizzieren und skizzenhaften Modellieren gestellt werden, sind:

- ergonomische Kriterien:
  - optimale visuelle Darstellung
  - großes Arbeitsvolumen
  - Vermeidung von köpernahen technischen Hilfsmitteln wie Brillen, Kabeln und Eingabegeräten
  - *Handlungsraum* und *Wahrnehmungs- bzw. Darstellungsraum* sollten *eine Einheit bilden*
- interaktive Kriterien:
  - einfache Benutzung und Erlernbarkeit (intuitive Interaktion),
  - hohe Fehlertoleranz,
  - große *Flexibilität* beim Skizzieren,
  - die *„Papier und Bleistift"-Metapher* sollte die Grundlage immersiver Skiziertechniken bilden.
- Modellierungskriterien:
  - *Mehrdeutige Formen* sollten erstellt werden können, die sich als mehrere konkrete Formen interpretieren lassen.
  - Eine *rasche* Erstellung unspezifischer Formen sollte möglich sein.
  - Bildhafte und symbolische Repräsentationsformen (*Formen, Wörter und Symbole)* sollten flexibel zu integrieren sein.
  - Kollaboratives Arbeiten sollte möglich sein.
  - Sowohl technische Komponenten als auch Prozesse sollten darstellbar sein.
- systemtechnische Kriterien:
  - Ein durchgängiger Datenaustausch mit CAD-Programmen, Produktdaten Management-Systemen (PDM) und Rapid Prototyping Verfahren sollte möglich sein

▷ Als schwerwiegendste Probleme wurden identifiziert:

- die *zeitliche Verzögerung* zwischen Handbewegung und Darstellung der Striche,
- die Ungenauigkeit verwendeter Trackingsysteme,
- das *Zeichnen von Details,*
- das Fehlen von „Hilfsebenen" zur Orientierung,
- das Fehlen von Funktionen zur automatischen Erzeugung von geraden Linien, Flächen und Grundkörpern,
- das Fehlen von Komfortfunktionen wie z. B. Kopieren, Spiegeln, Drehen um definierte Winkel.

▷ Die Teilnehmer und Autoren der Studien wünschten insbesondere folgende Funktionalitäten:

- Funktionen zum *Zeichnen von Linien und Kurven*
- Interaktive Möglichkeiten zur Auswahl *verschiedener Strichstärken* und Farben
- Möglichkeiten, verschiedene Werkzeuge einzusetzen (beispielsweise Schleifpapier)
- Möglichkeiten zur Animation und Simulation
- Möglichkeiten*, Modellierschritte rückgängig zu machen* (engl. *undo*)
- CAD-typische Manipulationsoperationen wie Rotieren, Verschieben und Skalieren
- physische Entlastung der Arme und Hände zur Erleichterung feinmotorischen Arbeitens
- haptische Simulation virtueller Zeichenflächen (virtuelle 2D-Boards)
- Einführung von Rastern und Referenzobjekten im Projektionssystem zur Unterstützung von Orientierung und Größeneinschätzung.

▷ Die Studien lassen den methodischen Einsatz des immersiven Skizzierens und skizzenhaften Modellierens insbesondere sinnvoll erscheinen

- zur *Erstellung und Manipulation von Ideen und Formen*
- zur Präsentation von Ideen und Formen mit der Möglichkeit zur interaktiven Reflektion
- als Prozessschritt nach der Papier- und Bleistiftskizze

▷ Die Übertragbarkeit einiger Untersuchungsergebnisse wird durch mangelhafte Ausführungsmethoden, sehr geringe Teilnehmerzahlen sowie dadurch begrenzt, dass die Teilnehmer überwiegend Künstler und keine im Produktentwicklungsprozess involvierten Designer und Konstrukteure waren.

▷ Ein reines Abbremsen der Zeichenbewegung mittels haptischer Interaktionsgeräte bewirkt lediglich geringe Vorteile in der Positionierungsgenauigkeit und keine in Bezug auf Richtungsabweichung und Ausführungsdauer. Das Unterstützungspotenzial durch haptische Interaktionsgeräte für das freihändige immersive Skizzieren ist vergleichsweise gering.

5.3 Ziele und Durchführung der Befragung

Zu Beginn des avisierten benutzterzentrierten Entwicklungsprozesses (Abschnitt 5.1, S. 108) stellten sich folgende Aufgaben:

- Die Ermittlung der Benutzeranforderungen an die funktionale Leistung des Systems sowie die Ermittlung von Akzeptanzschwellen bezüglich dreidimensionalen Skizzierens in (semi-) immersiven virtuellen Umgebungen.
- Die Generierung von Ideen für physische dreidimensionale Skizzierwerkzeuge (Tangible User Interfaces, Abschnitt 4.5, S. 93).
- Die Durchführung einer ersten Nutzenabschätzung.
- Die Verifizierung von Erkenntnissen aus vorigen Untersuchungen (Abschnitt 5.2, S. 108).
- Die Prognose des Charakters des dreidimensionalen Skizzierens im Vergleich zu herkömmlichen Skizzierprozessen.

In einem benutzterzentrierten Entwicklungsprozess (Abschnitt 5.1, S. 108) sind dazu Informationen bezüglich:

- der Aufgaben der Beteiligten,
- der Ausführung der Aufgaben,
- der Gestaltung und Organisation der Arbeit und
- der Gestaltung der jetzigen und zukünftigen Mensch-Maschine-Schnittstelle und des Arbeitsplatzes

zu ermitteln. Hierzu wurden fünf Einzelinterviews und zwei Fokusgruppen mithilfe halbstrukturierter Leitfadeninterviews durchgeführt, die sich an der Beispieldomäne Möbeldesign orientierten. Diese Domäne wurde gewählt, da hier in den frühen Phasen der Produktentwicklung neben Funktions- und Wirkprinzipien insbesondere Gestalt beschreibende Produktmodelle dominieren, durch dreidimensionales Skizzieren also besondere Vorteile erzielt werden könnten. Aufgrund

dieser Ausrichtung wurden die Teilnehmer nicht nach dem Prinzip statistischer Repräsentanz, sondern nach dem Prinzip der selektiven Stichprobenziehung ausgewählt (selektives Sampling). Dementsprechend wurden die relevanten Auswahlmerkmale für die Teilnehmer vor der Datenerhebung festgelegt, um diese Merkmale und deren Ausprägungen gezielt in die Ergebnisse zu integrieren.

5.3.1 Teilnehmer

Auswahlmerkmale für Teilnehmer waren eine Berufsausübung als Innenarchitekt, Designer oder Maschinenbauingenieur innerhalb der Möbeldesignbranche und eine Berufserfahrung von mindestens einem Jahr. Insgesamt wurden 14 Teilnehmer aus der Arena Möbeldesign eingeladen. Diese setzten sich aus Hochschulprofessoren (3), Innenarchitekten (3), Architekten (3), Designern (3) und Maschinenbauingenieuren (2) zusammen. Die Berufserfahrung betrug im Durchschnitt 11,6 Jahre.

Die Rekrutierung der Teilnehmer erfolgte per E-Mail und telefonischer Kaltakquise. Alle Teilnehmer der Fokusgruppen bekamen mit der Einladung einen Fragebogen mit offenen und geschlossenen Fragen zugeschickt, den sie ausgefüllt zur Fokusgruppe mitbrachten (siehe Anhang 12.7.1, S. 296). Im Fragebogen wurden neben demographischen Daten (z. B. erlernter Beruf, Berufserfahrung etc.) Kenntnisse zu CAD-Software und typische Arbeitsabläufe abgefragt. Die Ergebnisse dieser Vorabbefragung sind in Tabelle 5 aufgeführt.

Für die Fokusgruppen wurde im Vorfeld ein halbstrukturierter Leitfaden entwickelt, in dem der Ablauf grob festgelegt war (siehe Anhang 12.7.2, S. 300). Im Vorfeld wurde die Durchführung der Fokusgruppen in zwei Testsitzungen mit Designstudenten und Doktoranden erprobt, um die Moderationsfähigkeiten des Moderators und der Co-Moderatorin auszubauen und den Leitfaden zu überprüfen und zu verbessern. Außerdem wurden zuvor fünf Einzelinterviews mit halbstrukturiertem Leitfaden zum selben Thema durchgeführt, um bei den Moderatoren Verständnisfragen zu klären und Wissenslücken zu schließen und um weitere Ideen für die Fokusgruppendiskussionen zu generieren. Die daraus gewonnenen Ergebnisse flossen in die Überarbeitung des Fokusgruppenleitfadens ein, mit dessen Hilfe die angestellten Forschungsfragen gezielt adressiert und im Gruppenkontext untersucht werden sollten.

Die Fokusgruppen wurden per Videokamera aufgezeichnet, um das Datenmaterial ex post gezielt für die Auswertung zu nutzen. Alle Teilnehmer unterzeichneten dazu eine schriftliche Datenschutzerklärung. Jeder Teilnehmer erhielt außerdem eine Aufwandsentschädigung für sein Erscheinen. Die Fokusgruppen dauerten jeweils zwei Stunden und wurden vom Autor und einer Co-Moderatorin in den Räumlichkeiten des Fraunhofer Instituts für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik IPK Berlin durchgeführt.

Die Co-Moderatorin führte handschriftlich Protokoll. Außerdem wurden während der Veranstaltung für die Teilnehmer sichtbare protokollartige Mitschriften auf Flipcharts zur Visualisierung des Gesagten gemacht.

Der Zeitraum für die Durchführung der Einzelinterviews und der Fokusgruppen erstreckte sich von November 2006 bis Januar 2007.

Tabelle 5: Ergebnisse der Vorabbefragung (der Fragebogens wurde den Teilnehmern vor Beginn der Einzelinterviews und der Fokusgruppen zugesendet).

Teilnehmer	n=19
Beruf	Architekten, Innenarchitekten, Industriedesigner, Maschinenbauingenieure
Berufserfahrung in Jahren	M=11,6
CAD-Programme, die von den Teilnehmern genutzt werden:	3D Studio Max, Alias Studio tools, ArchiCAD, AutoCAD, Catia, Cinema 4D, Form Z, freeform, Inventor, ProEngineer, Rhinoceros, Solid Edge, Solid Works, Unigraphics, Vector works
Wie viele Skizzen und Modelle eines Möbelstücks fertigen Sie in den frühen Phasen an? (n=11)	- Handskizzen: 20 (häufigste Antwort); 28 (Durchschnitt) - 2D-CAD-Modelle: 1-2 (häufigste Antwort); 3 (Durchschnitt) - 3D-CAD-Modelle: 3-4 (häufigste Antwort); 3 (Durchschnitt) - physische Modelle: 0 (häufigste Antwort); 0,3 (Durchschnitt)
Welches sind Ihre Hauptaufgaben beim Entwerfen in den frühen Phasen der Formgestaltung?	Zeichnen mit der Hand, Messen, 2D-CAD-Skizzen, 3D-Objekt per CAD erzeugen, Analoge Modelle, Muster eins-zu-eins von ausführenden Firmen abzeichnen, Prototypen erstellen
Welches sind Ihre typischen Konstruktionsaufgaben? Was konstruieren Sie typischerweise?	Tische, Sideboards; komplette Restaurant- bzw. Hoteleinrichtungen; interaktive Exponate für den Ausstellungsbereich; Möbel; komplette Inneneinrichtungen; Leuchten für den Wohnbedarf; Leuchten für den Büroeinsatz
Wie viel Zeit verbringen Sie in einer typischen Arbeitswoche durchschnittlich mit Entwurfstätigkeiten?	M=25 % (ca. zwei Stunden pro Tag)
Welche Computereingabegeräte benutzen Sie? (mehrfach Antworten waren möglich, n=17)	- Computermaus (17 Nennungen) - Grafiktablett (fünf Nennungen) - Tastatur (vier Nennungen) - Space Mouse, Space Pilot (je eine Nennung) - 3D-Scan (eine Nennungen)

5.3.2 Methode Fokusgruppe

Als Hauptbefragungsinstrument wurden in dieser Studie Fokusgruppen gewählt. Fokusgruppen – ursprünglich ein Instrument aus der Marktforschung – sind moderierte Diskussionen in kleinen Gruppen von sechs bis acht Teilnehmern zu einen vorgegebenen Thema (vgl. Dürrenberger & Behringer, 1999; Krueger & Casey, 2000). Die Teilnehmer der Fokusgruppe repräsentieren eine größere Benutzergruppe, beispielsweise Experten, Anwender etc. Die Methode ermöglicht, ein Thema intensiv zu untersuchen, indem die Teilnehmer kooperativ und wetteifernd Ideen entwickeln und weiterverfolgen. Ihre besondere Wirksamkeit erhält die Fokusgruppe durch gruppen-

dynamische Prozesse des Austauschs und der Konfrontation. Die Bereitschaft zum Informationsaustausch ist besonders hoch, da die Teilnehmer ihre Meinung begründen und durch andere Ansichten inspiriert werden. Der Erfolg einer Fokusgruppe hängt stark von der Kompetenz der Moderatoren ab, Diskussionen zu initiieren, die Diskussion zu führen, ohne kreative Ideen und freies Reden zu unterdrücken, und die Diskussion auf das Thema zurück zu fokussieren, sobald sie zu stark abschweift. Zur Anregung kreativer Diskussionen und zum Setzen thematischer Schwerpunkte werden Stimuli empfohlen, die in Form von kurzen Referaten, Texten, Videoeinspielungen, Bildern oder Gegenständen eingebracht werden können (vgl. Dürrenberger & Behringer, 1999, S. 5).

Zusammenfassend stellen Fokusgruppen ein qualitatives Forschungsinstrument für die Ermittlung von Anforderungen und Bedürfnissen bezüglich neuer Produkte, Konzepte und Technologien im Vorfeld der Einführung dar, welche mit angemessenen Kosten und begrenztem Zeitaufwand durchgeführt werden können (vgl. Krueger & Casey, 2000). Exemplarische Handlungsanweisungen für die Vorbereitung, Durchführung und Auswertung von Fokusgruppen, können den Studien von Rötting et al. (2003) entnommen werden.

Zur Auswertung der Protokolle der Fokusgruppen wurde die qualitative Inhaltsanalyse nach Mayring (2003) gewählt. Mayring entwickelte mit der qualitativen Inhaltsanalyse eine systematische und intersubjektiv überprüfbare Textanalysemethode, die der Interpretationsfähigkeit und Bedeutungsvielfalt sprachlichen Materials weitestgehend gerecht wird.

5.3.3 Ablauf der Fokusgruppendiskussion

Der Ablauf beider Fokusgruppen war gleich, gekürzte Protokolle finden sich im Anhang 12.7 (S. 296). Beide Fokusgruppensitzungen wurden von zwei Moderatoren geleitet, die den Inhalt der Diskussion nur selten beeinflussten, jedoch immer dann intervenierten, wenn die Diskussion Gefahr lief, den Fokus zu verlieren.

Nach der Begrüßung durch den Moderator und die Co-Moderatorin erfolgte eine kurze organisatorische und inhaltliche Einleitung und eine Einstiegsmotivation für die Teilnehmer, in der die Grundkonzepte von Fokusgruppeninterviews angesprochen wurden. Danach machten sich die Experten in einer Vorstellungsrunde bekannt. Im Anschluss antworteten die Teilnehmer auf eine Reihe offener Fragen zum Themenbereich „Skizzieren und Möbeldesign“, die sich von Ablauf und Inhalt grob an einem Leitfaden orientierten. Dieser enthielt folgende Forschungsfragen, die aus den zuvor durchgeführten halbstrukturierten Einzelinterviews mit Experten zum selben Thema abgeleitet wurden (Anhang 12.7.2, S. 300):

- Welche Aufgaben und Tätigkeiten kennzeichnen die frühen Phasen der Formgebung im Möbeldesign?
- Welche Funktion hat das Skizzieren für das Entwerfen von Möbeln?
- Wie gestaltet sich der Prozess des Skizzierens von Möbeln?
- Welche Werkzeuge (Instrumente) werden genutzt?

Als Stimulus für die folgende Diskussion folgte eine kurze Videocollage (vgl. Frontdesign, 2006) als Überleitung auf den Themenbereich „Möbeldesign im virtuellen Raum“ mit folgenden Fragen:

- Welche Möglichkeiten und Grenzen hat das dreidimensionale Skizzieren?
- Worin bestehen Unterschiede und Gemeinsamkeiten zwischen zwei- und dreidimensionalem Skizzieren?

Nach der Diskussion der offenen Fragen des Leitfadens wurden mit der Moderationsmethode der Kartenabfrage Ideen zu folgender Frage generiert:

- Angenommen, man könnte im (virtuellen) Raum Möbel skizzieren, welche Funktionen bräuchte man dann, um diese 3D-Skizzen zu erstellen?

Die gesammelten Ideen wurden im Anschluss von den Teilnehmern zu Clustern zusammengefasst. Hierzu wurden die auf Karten notierten Ideen auf Pinwänden gruppiert. Diese Form der kommunikativen Validierung hatte das Ziel, eine Einigung bzw. Übereinstimmung über die Ergebnisse der Analyse zwischen Forschern und Beforschten diskursiv herzustellen (vgl. Mayring, 2003). Da die Teilnehmer ihre Ideen selber bestätigten und validierten, kann davon ausgegangen werden, dass die tatsächlichen Ideen und Gedanken der Teilnehmer als Ergebnisse gesichert werden konnten. Den so entstandenen Clustern sollten dann Namen gegeben werden. In einem abschließenden Schritt wurden den Clustern durch die Gruppe Instrumente und Werkzeuge zugeordnet, die die darin vereinten Funktionen, wenigstens zum Teil, erfüllen könnten. Auch dies stellt eine Eins-zu-eins-Repräsentation der Gruppenmeinung dar.

5.4 Auswertung

Die gewonnenen Notizen und die Ergebnisse der Kartenabfrage („Cluster“) wurden von den Moderatoren ausgewertet und nach Authentizität und Forscherübereinstimmung geprüft.

Den Zielen der Befragung entsprechend, wurden die Inhalte beider Fokusgruppen in Anlehnung an die qualitative Inhaltsanalyse nach Mayring (2003) einzeln deskriptiv analysiert, zusammengefasst, strukturiert und interpretiert und mit den durch die Teilnehmer erstellten Funktionsclustern abgeglichen und ergänzt.

Da in beiden Fokusgruppen derselbe Leitfaden verwendet wurde, konnten die Einzelergebnisse zu einem Gesamtergebnis zusammengefasst werden. Ergebnis sind somit die in Zusammenarbeit mit den Fokusgruppen entstandenen Cluster und die generierten Ideen aus der Gruppendiskussion. Auf die Durchführung weiterer Fokusgruppen wurde verzichtet, da die gesicherten Ergebnisse im Rahmen dieser Arbeit aussagekräftig genug waren.

5.5 Ergebnisse

Die Teilnehmer schätzten die potenziellen Eigenschaften dreidimensionaler Skizziersysteme überwiegend positiv ein („3D-Skizzen wären bestechend“, „würde das sofort anschaffen“). Als die zentralen Vorteile des immersiven dreidimensionalen Skizzierens gegenüber herkömmlichen Skizziermethoden wurden aus den Teilnehmeräußerungen ermittelt:

- *Räumlichkeit*: Die Möglichkeit, „mit dem Raum zu arbeiten“, räumliche Modelle zu erschaffen und die Raumwirkung der erstellten Modelle wahrzunehmen.

- *Proportion:* Die Möglichkeit, Modelle „eins-zu-eins“ zu skizzieren. Diese Eigenschaft wurde insbesondere im Vergleich zu CAD-Systemen hervorgehoben, „wo man die tatsächlichen Proportionen oft erst erkennt, nachdem das Produkt hergestellt ist“.

- *Assoziation:* Die Möglichkeit, vorhandene räumliche Objekte „in den Raum zu holen und damit weiterzuarbeiten“.

- *Formbarkeit*: Die Möglichkeit, räumliche Skizzen zu verformen.

Die Konsolidierung der von den Teilnehmern in beiden Sitzungen erstellten Cluster ergab die in Tabelle 6 aufgelisteten Funktionsgruppen, die von immersiven Virtual Reality-basierten dreidimensionalen Skizziersystemen gewünscht bzw. erwartet werden. Sie unterteilen sich in klassische, aus der Papierskizzen- und physischen Modellierpraxis bekannte Funktionen, und neue Techniken, die so nur in virtuellen Umgebungen möglich sind. Auch CAD-typische Modellierungsfunktionen fanden sich unter den gewünschten Funktionen (s. Diskussion im Abschnitt 5.6, S. 132).

Es werden von den Teilnehmern einerseits alle aus dem analogen, physischen Skizzieren und Modellieren bekannten Funktionen erwartet, und ebenso bekannte CAD-typische Modellierfunktionen. Funktionen, auf die in einem immersiven Skizziersystem verzichtet werden kann, wurden nicht genannt.

Zusätzlich werden auch neue, abstrahierende und inspirierende Funktionen von digitalen Unterstützungssystemen erwartet, die deren algorithmische Leistungsfähigkeit im Skizzierprozess auf unterschiedliche Weise zur Verfügung stellen. Beispiele hierfür sind Funktionen, Partikel (beispielsweise „Schnee“) auf Modelle zu träufeln, Modelle in „Zwiebelschichten“ auf- und abzutragen, Modelle zu überlagern und Ungenauigkeiten einführen zu können. Im Bereich Dynamik wurden solche Funktionen gesammelt, die den Entstehungsprozess digitaler Modelle nachbilden oder gegebenenfalls vortäuschen können, analog zu Prozessspuren, die bei der Bearbeitung physischen Materials entstehen und diesem einen spezifischen Charakter verleihen (beispielsweise aus einem Stein eine Figur herauszuschlagen). Auch Funktionen, im digitalen Raum kreative Umgebungsbedingungen zu schaffen, wurden gewünscht, beispielsweise durch das Einblenden zusätzlicher digitaler Informationen und Räume, die den Kontext darstellen, in dem das Produkt gebraucht würde (beispielsweise Restaurants oder Büros). Damit wird deutlich, dass von digitalen Unterstützungssystemen des Skizzierens und Modellierens weit mehr Funktionen erwartet werden als die reine Umsetzung von Körperbewegungen in geometrische Formen.

Von den in der Auswertung ermittelten gewünschten Funktionen wurden exemplarisch diejenigen prototypisch realisiert und evaluiert, die einen besonderen Skizzierbezug aufweisen, dazu gehören ein drucksensitiver Stift, ein Werkzeug zur Extrusion von Bézierkurven und eine History Funktion mittels Schieberegler (siehe Anhang 12.1, S. 274).

Tabelle 6: Ergebnisse der Fokusgruppen: Funktionen für das dreidimensionale Skizzieren (kursiv hervorgehobene Funktionen wurden prototypisch realisiert und evaluiert, vgl. Kapitel 7, 9 und Anhang 12.1, S. 274).

Funktionsgruppe	Beispiel
klassische Zeichentechniken	*zeichnen,* radieren
klassische Modellierungstechniken	abtragen, auftragen
klassische CAD-Modellierung	geometrische Standardkörper erstellen und manipulieren, skalieren, spiegeln, schneiden, kopieren
neue 3D-Zeichentechniken	*Abzeichnen realer Gegenstände, Rückgängig Funktion („Undo"), Einsatz virtueller Schablonen*
neue 3D-Modelliertechniken	kneten, stauchen, zerren, drücken, falten, dehnen
Abstraktionstechniken	Modelle überlagern, Ungenauigkeiten einführen, Zwiebelschichten mit Transparenz, Nebelfiguren, Partikel aufträufeln
Dynamik	Darstellen von Bewegungsspuren und Prozesswirkungen, *History*: bewahren der Varianten einer Skizze
Umgebungsbedingungen	Schritt- und Körpermaße, Kontext einbeziehen, kreative Umgebung, *reale Proportionen*

In Hinblick auf die Grenzen des dreidimensionalen Skizzierens wurde von der großen Mehrheit der Teilnehmer betont, dass Papierskizzen nicht verdrängt würden („wenn es ein neues Medium gibt, dann wird das alte nicht verloren gehen"). Die fehlende Materialität („Material ist Ideen gebend") und fehlende Auflageflächen und Bezugsebenen wurden als hinderlich eingeschätzt („man kann im Raum keinen perfekten Kreis zeichnen", „es gibt zu viele Freiheitsgrade", „Punkte im Raum wiederzufinden ist schwierig").

Beide Primärfunktionen der Skizze, eine Gedächtnisstütze zu sein (Externalisierung) und die Selbstkommunikation zu unterstützen, wurden von den Experten klar benannt („Ich habe das Bild bereits im Kopf, oder ich versuche die verschiedenen Möglichkeiten herauszubilden.").

Auch sämtliche der von Buxton genannten Skizzen- und Skizziereineigenschaften (vgl. Tabelle 7) wurden von den Teilnehmern genannt. Lediglich in Bezug auf die geringe Bereitschaft, Skizzen zu verwerfen, ergab sich ein Widerspruch. Skizzen wurden in diesem Zusammenhang häufig als „persönlich", „privat" oder „intim" beschrieben, die selbst „nach zehn Jahren" noch verrieten, „was man damit wollte".

Tabelle 7: Charakteristische Eigenschaften von Produktskizzen nach Buxton (2007) und entsprechende Expertenaussagen aus den durchgeführten Fokusgruppen.

Prozess des Skizzierens	Schnelligkeit der Erstellung	„die Hand ist unschlagbar am schnellsten“
	Zeitliche Verfügbarkeit	„Papier und Stift sind ein Medium, das immer verfügbar ist“
	Geringe Kosten	„man braucht den technischen Aufwand nicht, Papier reicht“
	Verwerfbarkeit	*gegenteilig*: “ich glaube, ich habe in 30 Jahren noch nie eine Zeichnung weggeworfen”
Ergebnis des Skizzierens	Viele Varianten existieren nebeneinander	„ich fertige teilweise 30 Entwürfe von der selben Sache an“
	Klar als Skizze erkennbar (Stil)	„Skizzen haben eine Art wie Notizen“
	Charakteristische Skizziersprache	„Skizzen sehen ‚anders’ aus“
	Wenige Details	„Skizzen werden deutlicher, wenn man Details wegnimmt“
	Angemessener Verfeinerungsgrad	„Die Skizze ist noch nicht so ausformuliert“
	Vorschlagscharakter	„Die Skizze ist ein Denkapparat“
	Mehrdeutigkeit	„Skizzen beinhalten die verschiedenen Möglichkeiten, die noch teilweise verschwommen im Raum liegen“

Bei einigen Teilnehmern wurden innere Widerstände gegen dreidimensionales Skizzieren deutlich („hier bekommt es so ein ‚easy doing’ (…) und dieses Moment, das auch im Kontext Mensch zu realisieren, geht immer mehr verloren“, „man braucht den technischen Aufwand nicht, Papier reicht“). Diese konnten durch die Art der Befragung und die Diskussion in der Gruppe schrittweise abgebaut werden („Material in die Luft zu kreieren, dass ist ja schon begeisternd.“), so dass insgesamt verwertbare Ergebnisse entstanden.

5.6 Diskussion und Schlussfolgerungen

Als wichtigstes Ergebnis der Fokusgruppen ist festzustellen, dass die Teilnehmer dreidimensionales Skizzieren als potenziell geeignet ansehen, typische Skizzierfunktionen zu erfüllen. Es besteht auch der Wunsch, weitere Möglichkeiten immersiver dreidimensionaler Virtual Reality-Systeme im Skizzierkontext zu nutzen.

Die Tendenz der Teilnehmer, in der Diskussion neben Skizziertechniken auch häufig CAD-Zeichen- und Modelliertechniken zu erwähnen, lässt mehrere Schlüsse zu:

- Die Teilnehmer trennen nicht, oder nur wenig bewusst, zwischen Skizzieren und CAD-Modellierung, insbesondere verblassen die Vorteile einiger Skizzeneigenschaften (beispielsweise die charakteristische Skizziersprache) beim Vergleich mit CAD-Werkzeugen. Die Teilnehmer sehen im Gegenteil einen Vorteil darin, schon in den frühen Entwicklungsphasen exakte Flächen und Körper erstellen und modifizieren zu können.

- Skizzieren und der Gebrauch von CAD-Systemen werden von den Teilnehmern als eng miteinander verknüpfte Tätigkeiten angesehen (Abschnitt 2.2, S. 21). Beim Einsatz digitaler Skiziertechniken wird daher eine einfache Integration in CAD-Systeme erwartet, eine Trennung aus theoretischen Erwägungen stieße auf Unverständnis.

- Im Vordergrund des Interesses der Teilnehmer steht der Wunsch, innere Produktbilder zufriedenstellend externalisieren zu können, Medium und Werkzeuge sind von nachgeordnetem Interesse; die Teilnehmer nehmen ihre Fähigkeit, innere Produktbilder zu externalisieren, als eine Fähigkeit wahr, die zu einem großen Maß unabhängig von Medium und Werkzeug ist.

Die Ergebnisse der Fokusgruppen lassen große qualitative Unterschiede zwischen dem klassischen zwei- und dreidimensionalen Skizzieren vermuten. Insbesondere die Begehbarkeit des Modells bzw. der Skizze und das direkte Zeichnen in den Raum ohne die Übersetzung auf eine zweidimensionale Fläche wurden von den Teilnehmern als potenzielle Vorteile gesehen. Nachteilig wurden das Fehlen einer Auflagefläche und die damit verbundene Ermüdung der Hand eingeschätzt.

Das gemeinsame Erarbeiten der Kategoriencluster durch die Teilnehmer erhöhte die Reliabilität der Ergebnisse und bildet das unverzerrte Meinungsbild der Teilnehmer ab, Verzerrungen durch die Moderatoren konnten so vermieden werden. Die Objektivität der Auswertung wurde weiterhin durch die Intersubjektivität der Moderatoren gewährleistet. Die Ergebnisse rechtfertigen insgesamt den Einsatz der Fokusgruppen, da durch den Gruppenprozess kreative Denkprozesse freigesetzt wurden, die in den geführten Einzelinterviews in dieser Form nicht angeregt werden konnten.

Die Meinungen der Teilnehmer der Fokusgruppen zum immersiven dreidimensionalen Skizzierens können folgendermaßen zusammengefasst werden:

- ▷ Die große Mehrheit der Teilnehmer sieht hohes Potenzial im dreidimensionalen Skizzieren, anfängliche Widerstände verschwanden oft im Laufe der Diskussion.
- ▷ Das Thema dreidimensionales Skizzieren ist positiv konnotiert.
- ▷ Als zentrale Vorteile werden gesehen: Räumlichkeit, Proportion, Assoziation, Formbarkeit.
- ▷ Zu den von den Teilnehmern gewünschten Funktionen eines immersiven Skizziersystems gehören:
  - klassische Zeichentechniken
  - klassische Modellierungstechniken
  - klassische CAD-Modellierung
  - neue 3D-Zeichentechniken
  - neue 3D-Modelliertechniken
  - Abstraktionstechniken

- Dynamik
- Umgebungsbedingungen

▷ (Immersives) Skizzieren und der Einsatz von CAD-Systemen werden von den Teilnehmern als eng miteinander verknüpfte Tätigkeiten angesehen; entsprechende Systeme sollten daher integrierte Lösungen anbieten.

▷ Papierskizzen werden nach Meinung der Teilnehmer auch in Zukunft genutzt.

▷ Die zentralen Funktionen der Skizze, Gedächtnisstütze und Mittel der Selbstkommunikation zu sein, sowie die Eigenschaften klassischer Skizzen nach Buxton (2007) wurden durch Teilnehmeräußerungen ebenfalls bestätigt. Diese Eigenschaften wurden mit geringen Modifikationen auch mit dreidimensionalen Skizzen assoziiert.

5.7 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde durch eine zusammenfassende Diskussion bisheriger Studien und eine eigene empirische Untersuchung mittels Fokusgruppen erstmals eine umfassende Darstellung

- der potenzieller Vorteile und Alleinstellungsmerkmale,
- der von potenziellen Anwendern gewünschten Unterstützungsfunktionen und
- der ergonomischen, interaktiven, systemtechnischen und modellierungstechnischen Kriterien

des immersiven dreidimensionalen Skizzierens erstellt. Darüber hinaus wurden Probleme bisher implementierter Systeme diskutiert.

Hierdurch konnte eine bisher bestehende Lücke geschlossen werden, da eine methodisch fundierte benutzerseitige Anforderungsanalyse in dieser Form bisher nicht durchgeführt wurde. Auch wurde deutlich, dass bisherige Studien nicht alle Anforderungen an methodische Durchführung, Teilnehmerzahl und beruflichen Hintergrund der Teilnehmer erfüllten.

Durch die gründliche Exploration der Ideen und Akzeptanzschwellen der avisierten Nutzer und Experten in Form der Recherche bisheriger Studien und eigener Fragebögen, Einzelinterviews und Fokusgruppen, konnte die Arena der Aspekte, die das dreidimensionale Skizzieren in der frühen Phase der Produktentwicklung und Formgebung betreffen, umfassend abgebildet werden. Damit wurde eine Grundlage für die Weiterentwicklung dreidimensionaler Skizziersysteme geschaffen und deren praktischer Nutzen im Vorfeld kritisch geprüft.

6
Ableitung von Hypothesen zum Unterstützungspotenzial des immersiven dreidimensionalen Skizzierens für kreative Skizzierprozesse

CAD-Programme, Virtual Reality und Rapid Prototyping-Instrumente müssen gerade in den störempfindlichen kreativen frühen Phasen des Entwerfens „selbstlos" unterstützen: Sie müssen also möglichst wenig begrenzte geistige Kapazität nur für ihren eigenen Einsatz binden, um das eigentliche inhaltliche Entwurfsproblem bestmöglich zu unterstützen und sollten einen ungebrochenen schnittstellenfreien Informationsfluss von der Handskizze oder vom impromptu-Modell in die CAD-Skizze oder das prototyping-Modell ermöglichen.

Hacker (2007, S. 4)

Immersive Skizziersysteme existieren seit mehreren Jahren, haben jedoch den prototypischen Entwicklungszustand nicht verlassen und werden noch nicht produktiv eingesetzt. Dies steht im Kontrast zu den Wünschen der potenziellen Anwender, die, das ergab die Anforderungsanalyse in Kapitel 5, von solchen Systemen ein großes Unterstützungspotenzial erwarten und sich eine große Funktionsvielfalt wünschen.

Durch die Anforderungsanalyse wurde weiterhin sichtbar, dass bisher kaum empirisch gesicherte Erkenntnisse über das Unterstützungspotenzial immersiver Skizziersysteme vorliegen, und deren Entwicklung aus Sicht des User Centered Design somit Lücken aufweist. Ziel dieser Arbeit ist es, einige wesentliche Lücken zu schließen. Um die Forschungsfragen dieser Arbeit aus Abschnitt 1.2 (S. 8) zu beantworten, werden in diesem Kapitel, aufbauend auf der Anforderungsanalyse, Hypothesen zum Unterstützungspotenzial des immersiven dreidimensionalen Skizzierens für kreative Entwurfsprozesse abgeleitet. Darüber hinaus werden Hypothesen zur grundsätzlichen Gestaltung von Skizzierwerkzeugen formuliert. Diese sind Gegenstand der nachfolgenden Studien 2 bis 4.

6.1 Forschungsfragen

In Abschnitt 1.2 (S. 8) wurden die Forschungsfragen 2 und 3 dieser Arbeit folgendermaßen formuliert:

2. Erschließt das dreidimensionale Skizzieren im Vergleich mit dem zweidimensionalen Skizzieren qualitativ neue Unterstützungsfunktionen für kreative Entwurfsprozesse? Wo liegen Vor- und Nachteile?
3. Wie wirkt sich die Gestaltung der Interaktionswerkzeuge und der Schnittstelle zwischen Anwender und virtueller Umgebung auf die Lösung a) einfacher Interaktionsaufgaben und b) komplexer Skizzieraufgaben aus?

Die Forschungsfrage 2 bezieht sich auf das *Medium* des Skizzierens, hier den zwei- und dreidimensionalen Raum. Dahinter steht die Frage, ob es sich *lohnt*, immersive Umgebungen als Skizziermedien einzuführen.

Die Forschungsfrage 3 adressiert die grundsätzliche *Gestaltung* der *Interaktionswerkzeuge*, zunächst zur Lösung allgemeiner Aufgaben und darauf aufbauend zur Lösung von Skizzieraufgaben. Sie postuliert im Sinne der Aufgabendekomposition einen Zusammenhang der Lösungsdauer und -güte zwischen basalen Interaktionsaufgaben (3a) wie dem Rotieren und Positionieren (canonical manipulation tasks, Abschnitt 4.3.3, S. 75) und komplexen Aufgaben wie dem Skizzieren (3b). Im semiotischen Interaktionsmodell (Abschnitt 4.2, S. 67) lassen sich die basalen Interaktionsaufgaben den unteren Ebenen, d. h. dem Interaktionsproblem (vgl. Streitz, 1986) zuordnen, die komplexen Aufgaben dagegen den oberen, semantischen Ebenen, d. h. dem Gesamtproblem (ebd.).

Die Forschungsfragen 2 und 3b sollen wie in der Studie 1 im Kontext der Domäne des Möbeldesigns untersucht werden (Abschnitt 5.3, S. 125). Diese Domäne wurde wie bereits erwähnt gewählt, da hier neben Funktions- und Wirkprinzipien insbesondere Gestalt beschreibende Produktmodelle dominieren, durch dreidimensionales Skizzieren also besondere Vorteile erzielt werden könnten (vgl. auch Anhang 12.2, S. 276). Um gute Untersuchungsbedingungen bei hoher externer Validität[1] zu erzielen, wurden für die folgenden Studien Szenarien angestrebt, in denen das Skizzieren einen hohen Anteil im herkömmlichen Lösungsfindungsprozess einnimmt. Es wurden daher Szenarien der frühen, konzeptionellen Produktentwicklungsphasen gewählt, in denen die ersten Produktbilder entstehen und vergleichsweise wenige Produktdetails untersucht werden (Abschnitt 2.1, S. 16, und Abschnitt 2.3, S. 29). Die Untersuchung des immersiven Skizzierens in späteren Produktentwicklungsphasen, beispielsweise in Kombination mit CAD-Modellen des Embodiment Design, bleibt somit Gegenstand zukünftiger Studien (Abschnitt 10.2, S. 240). Weiterhin erfolgt eine Einschränkung der untersuchten Entwurfsmethoden auf das Stift-basierte Skizzieren, welches aufgrund der verwendeten Stiftmetapher eine vergleichsweise hohe externe Validität aufweist (vgl. Pache, 2005). Andere Methoden der „skizzierenden Formge-

[1] Externe Validität: „Generalisierbarkeit eines Untersuchungsergebnisses auf andere Personen, Situationen und/oder Zeitpunkte. Die externe Validität wächst mit zunehmender Natürlichkeit der Untersuchungssituation (ökologische Validität) und wachsender Repräsentativität der untersuchten Stichproben." (Bortz & Döring, 2006, S. 727)

staltung“, wie das Modellieren mittels Tonmodellen oder Collagen (Abschnitt 2.1.2, S. 17), wurden in den Studien dieser Arbeit aus forschungsökonomischen Gründen nicht berücksichtigt, jedoch konzeptionell vorbereitet oder bereits implementiert (Anhang 12.1, S. 274, und Anhang 12.5.2, S. 285).

Die Forschungsfrage 3a zur Lösung einfacher Interaktionsaufgaben wurde unabhängig von einem spezifischen Kontext untersucht, da sie sich nicht auf branchenspezifisches Vorwissen, sondern auf allgemeine sensumotorische Fertigkeiten bezieht.

6.2 Operationalisierung des Unterstützungspotenzials kreativer Skizzierprozesse

Um die Forschungsfragen in den folgenden Studien 2 bis 4 empirisch untersuchen zu können, werden aus der Theorie der Kapitel 2 bis 4 und den Ergebnissen des Kapitels 5 Hypothesen abgeleitet. Zur Überprüfung der Hypothesen müssen Operationen, „die zur Erfassung des durch den Begriff bezeichneten Sachverhaltes notwendig sind, oder (...) messbare Ereignisse [gefunden werden], die das Vorliegen dieses Sachverhaltes anzeigen“ (Bortz & Döring, 2006. S. 63). Die Operationalisierung der (Unter-)Hypothesen sowie die Auswertung und Interpretation der Untersuchungsergebnisse erfolgt in den entsprechenden Kapiteln:

- Hypothese 1: Studie 2 (Operationalisierung: Abschnitt 7.3, S. 147; Auswertung: Abschnitt 7.7, S. 156)
- Hypothese 2: Studie 3 (Operationalisierung: Abschnitt 8.5, S. 188; Auswertung: Abschnitt 8.9, S. 192)
- Hypothese 3: Studie 4 (Operationalisierung: Abschnitt 9.3, S. 209; Auswertung: Abschnitt 9.6, S. 213)

6.3 Hypothese 1: Unterstützungspotenzial immersiver dreidimensionaler Skizziersysteme für kreative Entwurfsprozesse

Die Forschungsfrage 2 sucht nach dem Unterstützungspotenzial des immersiven dreidimensionalen Mediums VR für kreative Entwurfsprozesse. Die wesentliche Bedeutung des konventionellen Skizzierens für frühe Produktentwicklungsphasen wurde in Kapitel 2 dargelegt: Papierbasiertes Skizzieren wird trotz oder gerade wegen des vermehrten Einsatzes rechnergestützter Entwurfsmethoden (CAD) als Unterstützungsmethode der Ideenfindung und Konzeption verwendet; es unterstützt das für frühe Phasen charakteristische adaptive, sprunghafte („opportunistische“) Wechseln zwischen konkreten und abstrakten Produktmodellen; beim schrittweisen Modellieren von Produkteinzelteilen ergänzen sich papierbasiertes Skizzieren und CAD-Methoden. Die kognitiven Funktionen des Skizzierens und dessen Bedeutung für kreative Entwurfsprozesse wurden in Kapitel 3 dargelegt: Skizzieren entlastet demnach das Arbeitsgedächtnis und erhöht die Kapazität der während der Entwurfsphase aktiv zur Verfügung stehenden Informationen; Skizzen können inneren Bildern ihre Flüchtigkeit nehmen und die zu äußeren Bildern in Bezug setzen, d. h. objektivieren; durch Skizzieren kann die Dynamik innerer Bilder in äußere Entwürfe und Ideen einfließen. Die Ausformung intern verfertigter Lösungen und Ideen geschieht in reflexiven

„mentalmotorischen Prozessen“ (Sachse, 2002, S. 33), die als Selbstkommunikation beschrieben werden können. Die äußere Umgebung kann wiederum „Bausteine“ für kreative Denkprozesse bereitstellen und diese stimulieren. Wie innere in äußere Bilder abgetragen und von diesen reflexiv beeinflusst werden, wird wesentlich durch die Interaktionsfreiheitsgrade des Externalisierungsmediums bestimmt. Für divergente, kreative Lösungsabschnitte sollte das Medium vergleichsweise viele, für konvergente, präzisierende Arbeiten weniger Interaktionsfreiheitsgrade aufweisen.

Es lässt sich zusammenfassen:

▷ Das Potenzial technischer Medien und Werkzeuge zur Unterstützung kreativer Prozesse kann durch folgende Parameter bewertet werden:

- Flüssigkeit: Unterstützung des flüssigen, reflektiven Handelns (Abschnitt 3.1.5, S. 43ff),
- Störungen: geringes Rauschen im Selbstkommunikationsprozess (Abschnitte 3.1.5, S. 43ff, und 4.4, 84ff; Anhang 12.3, S. 279f und 12.4, S. 280ff),
- Vorgehen: Ermöglichen eines „opportunistischen“ Vorgehens (Abschnitt 3.1.1, S. 34ff),
- Freiheitsgrade: Werkzeug und Medien weisen viele Freiheitsgrade auf (Abschnitt 3.2.6, S. 55ff),
- Embodiment: Unterstützung „mentalmotorischer Prozesse“ der Lösungsentwicklung (Abschnitt 3.1.4, S. 42ff), sowie
- Umgebung: Integration von Umweltinformationen (Abschnitt 3.2.4, S. 52ff).

Welches Unterstützungspotenzial lässt sich durch den Einsatz immersiver Medien im Skizzierprozess in Hinblick auf diese Parameter erwarten? Die Möglichkeiten, durch Virtual Reality-Technologien Skizzierprozesse zu unterstützen, wurden in Kapitel 4 dargelegt. Insbesondere die räumliche, stereoskopische Darstellung virtueller Daten (Parameter Freiheitsgrade; Abschnitt 4.3, S. 70ff), Echtzeit-Interaktivität (Parameter Flüssigkeit, Vorgehen; Abschnitt 4.3.2, S. 72ff) und die hohe Kompatibilität des Mediums VR zum sensumotorischen Apparat des Menschen (Parameter Embodiment, Abschnitt 4.1.1, S. 60ff, Abschnitt 4.3, S. 70ff), lassen hypothetisch ein besonderes Unerstützungspotenzial virtueller Umgebungen vermuten. Andererseits müssen die diskutierten Probleme der Integration virtueller und physischer Umgebungen auch für virtuelle Skizziersysteme erwartet werden (Parameter Störungen), beispielsweise der Akkommodations-Konvergenz-Konflikt, Versatz der Bezugsysteme, fehlerhafte Verdeckungen und Probleme durch die Latenz der Tracking- und Visualisierungssysteme (Parameter Störungen, Abschnitt 4.4.1, S. 85ff).

Auch die bisherigen Studien (Abschnitt 5.2, S. 108ff) und die qualitative Anforderungsanalyse (Abschnitt 5.5, S. 129ff) bestätigen die wesentlichen Unterstützungspotenziale des immersiven dreidimensionalen Skizzierens und skizzenhaften Modellierens auf hypothetischem Niveau:

- die *Räumlichkeit* des Mediums, die es erlaubt, innere Produktbilder direkt dreidimensional zu externalisieren (Parameter Freiheitsgrade),

- die *Proportionalität*, die es möglich macht, Produktgesamtgröße und -proportionen schon während des Skizzierens zu erfassen (Parameter Embodiment),
- die Möglichkeit, *Assoziationen* durch virtuelle Stimuli im dreidimensionale Raum zu wecken (Parameter Umgebung) und
- die *Formbarkeit* der virtuellen Skizzen und Modelle, die ein flexibles und adaptives Arbeiten ermöglicht (Parameter Flexibilität, Vorgehen).

Zur Untersuchung der Forschungsfrage 2 wird daher folgende Hypothese formuliert:

☐ Hypothese 1: Immersive virtuelle Medien weisen viele Freiheitsgrade zur Externalisierung innerer Bilder auf. Sie sind daher im Vergleich zu herkömmlichen Medien besser zur Unterstützung kreativer Entwurfsprozesse geeignet.

Um diese Hypothese untersuchen zu können, muss der Begriff „kreativer Entwurfsprozess" operationalisiert werden. Dies geschieht in Kapitel 7 (Abschnitt 7.3, S. 147; vgl. Auswertung in Abschnitt 7.7, S. 156). Es fließen dazu die benutzerseitig wahrgenommene Qualität des Skizzierprozesses, quantitative Maße des Prozesses (u. a. Bewegungsgeschwindigkeit, Skizzierdauer) sowie lösungsbezogene Skizzeneigenschaften (u. a. Funktions- und Wirkprinzip) als auch lösungsunabhängige Skizzeneigenschaften (u. a. Größe, Volumen) als abhängige Variablen in das Versuchsdesign ein.

Zur Untersuchung des Unterstützungspotenzials immersiver dreidimensionaler Skizziersysteme für kreative Skizzierprozesse werden in der Studie 2 der Parameter *Freiheitsgrad* variiert und die Auswirkungen auf weitere Parameter untersucht. Die *Störparameter* sollen zwischen den Versuchsbedingungen möglichst konstant gehalten werden, um die Effekte auf die Veränderung des Freiheitsgrades zurückführen zu können.

6.4 Hypothese 2: Gestaltung von VR-Interaktionswerkzeuge zur Erhöhung der Gebrauchstauglichkeit basaler Interaktionen

In der Forschungsfrage 3 wird gefragt, welche Auswirkungen die Gestaltung der Interaktionswerkzeuge im PHV-Kontinuum physischer, hybrider und virtueller Objekte (Abschnitt 4.5.3, S. 98ff, Abbildung 41) auf die Gebrauchstauglichkeit der Interaktion hat. Im Sinne der Aufgabendekomposition werden mit der Forschungsfrage 3a basale Interaktionen adressiert (canonical manipulation tasks, Abschnitt 4.3.3, S. 75ff), aus denen sich die später zu untersuchenden Skizzierhandlungen (3b) aber auch andere komplexe Interaktionen zusammensetzen.

Das PHV-Kontinuum postuliert für hybride Objekte, welche aus einem physischen Griff und einer virtuellen Erweiterung bestehen, eine Reihe von Vorteilen gegenüber rein virtuellen und rein physischen Objekte. Dazu zählen ein geringes Rauschen und eine optimale multisensorische Integration (Abschnitt 4.1.3, S. 66) zwischen der Hand des Benutzers und dem physischem Objektgriff, die Möglichkeit der feinmotorischen Manipulation des Interaktionswerkzeugs aufgrund dessen physischer Repräsentation sowie keine Wahrnehmungsprobleme zwischen Objektspitze und virtueller Umgebung, da beide virtuell repräsentiert sind. Wahrnehmungsprobleme wie die

oben genannten treten dagegen zwischen Objektspitze und Objektgriff auf. Zur Untersuchung der Forschungsfrage 3a wird daher folgende Hypothese formuliert:

☐ Hypothese 2: Hybride Objekte reduzieren das Rauschen in der Mensch-Maschine-Interaktion zwischen Mensch, Werkzeug und virtueller Umgebung. Sie ermöglichen daher effektivere, effizientere und zufriedenstellendere Interaktionen als rein physische oder rein virtuelle Objekte.

Ob diese spezifische Funktionsallokation vorteilhaft für die Ausführung basaler Interaktionsaufgaben ist, soll anhand der Kriterien der Gebrauchstauglichkeit überprüft werden. Die Gebrauchstauglichkeit (engl. *usability*) wird gemäß der ISO 9241 als Effektivität[1], Effizienz[2] und Benutzerzufriedenheit[3] beim Lösen einer Aufgabe mittels eines interaktiven technischen Systems definiert (DIN EN ISO 9241-110, 2006). Dementsprechend erfolgt auch die Operationalisierung der Hypothese in Abschnitt 8.5 (S. 188).

Zur vergleichenden Untersuchung der Gebrauchstauglichkeit hybrider Objekte für eine Interaktionsaufgabe werden in der Studie 3 die *Störparameter* variiert und die Auswirkungen auf weitere Parameter untersucht. Die *Freiheitsgrade* sollen zwischen den Bedingungen möglichst konstant gehalten werden, um die Effekte auf die Repräsentation des Interaktionswerkzeugs zurückführen zu können.

6.5 Hypothese 3: Gestaltung von VR-Interaktionswerkzeugen zur Unterstützung kreativer Skizzierprozesse

Die Hypothese 2, nach der eine Änderung der Werkzeugrepräsentation einen Einfluss auf deren Gebrauchstauglichkeit zur Lösung einfacher Aufgaben hat, wird mit der Hypothese 3 auf komplexe Skizzieraufgaben erweitert. Dem liegt die Annahme zugrunde, dass die Gebrauchstauglichkeit eines Gesamtsystems zur Lösung einer komplexen Aufgabe durch die Gebrauchstauglichkeit des Systems bei der Lösung von Sub-Aufgaben determiniert wird (Aufgabendekomposition, Abschnitt 4.3.3, S. 75ff). Zur Untersuchung der Forschungsfrage 3b lässt sich daher folgende Hypothese formulieren:

---

[1] Effektivität: Genauigkeit und Vollständigkeit, mit der Benutzer gegebene Ziele erreichen (vgl. DIN EN ISO 9241-110, 2006).

[2] Effizienz: Verhältnis der eingesetzten Ressourcen und der dafür erreichten Zielgenauigkeit und –vollständigkeit (ebd.)

[3] Benutzerzufriedenheit: Abwesenheit von Beschwerden und eine positive Einstellung zum Produkt (ebd.)

☐ Hypothese 3: Hybride Objekte reduzieren das Rauschen in der Mensch-Maschine-Interaktion zwischen Mensch, Werkzeug und virtuellem Medium und ermöglichen flüssigeres Skizzieren als mittels rein physischer oder rein virtueller Objekte. Sie sind daher im Vergleich zu herkömmlichen Medien besser zur Unterstützung kreativer Entwurfsprozesse geeignet.

Diese Hypothese soll zusätzlich zu den allgemeinen Kriterien der Gebrauchstauglichkeit auch auf die Unterstützung des kreativen Entwerfens, hier des kreativen Skizzierens, geprüft werden. Es werden daher in der Studie 4 dieselben Operationalisierungen wie in Studie 2 vorgenommen (Abschnitt 9.3, S. 209; Auswertung: Abschnitt 9.6, S. 213).

Zur vergleichenden Untersuchung der Gebrauchstauglichkeit hybrider Werkzeuge für Skizzieraufgaben wird in der Studie 4 wie in Studie 3 der *Störparameter* variiert und die Auswirkungen auf weitere Parameter untersucht. Die *Freiheitsgrade* sollen zwischen den Versuchsbedingungen konstant gehalten werden, um die Effekte auf die Repräsentation des Skizzierwerkzeugs zurückführen zu können.

6.6 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden aus den übergeordneten Forschungsfragen dieser Arbeit drei Hypothesen abgeleitet, die als Grundlage der folgenden Studien dienen. Die Hypothesen postulieren sowohl einen Einfluss der Freiheitsgrade des Skizziermediums als auch der Repräsentation der Interaktions- und Skizzierwerkzeuge auf das Unterstützungspotenzial für kreative Entwurfsprozesse sowie auf die allgemeine Gebrauchstauglichkeit des Gesamtsystems. Die Hypothesen werden in den kommenden Kapiteln in Unterhypothesen überführt und operationalisiert.

7
Studie 2: Vergleichende Untersuchung des immersiven Skizzierens mit zwei und drei räumlichen Freiheitsgraden

Um die Auswirkungen des Einsatzes immersiver dreidimensionaler Umgebungen als Skizziermedien und die Merkmale des immersiven dreidimensionalen Skizzierens zu untersuchen, wurde eine vergleichende Benutzerstudie mit 24 Produktdesignern sowie Innenarchitekten aus dem Bereich Möbeldesign durchgeführt. In der Studie wurden verschiedene Skizzieraufgaben ebenfalls aus dem Bereich Möbeldesign gestellt und vergleichend evaluiert.

Die Studie hatte zum Ziel, die Hypothese 1 zu untersuchen, wonach immersive virtuelle Medien (Virtuelle Umgebungen, Virtual Reality) viele Freiheitsgrade zur Externalisierung innerer Bilder aufweisen und daher zur Unterstützung kreativer Entwurfsprozesse geeignet sind (Abschnitt 6.3, S. 137). In der Studie wurde daher der *Freiheitsgrad des Skizziermediums* variiert (unabhängige Variablen), die technischen Störvariablen jedoch konstant gehalten. Die Operationalisierung der Effekte erfolgte u. a. mittels der Abfrage der benutzerseitig wahrgenommenen Qualität, quantitativer Maße des Prozesses (Bewegungsgeschwindigkeit, Skizzierdauer) und der Skizzen (Größe, Volumen), Auswertungen der Skizzenelemente (Abstraktionsstufen, perspektivische Darstellung) sowie in einer Expertenbewertung der erstellten Skizzen (abhängige Variablen).

Es konnte gezeigt werden, dass immersives dreidimensionales Skizzieren den Skizzierprozess in einigen Punkten wesentlich verändert (beispielsweise in den Faktoren Stimulation, Darstellungsform, Interaktivität, Proportionalität) und qualitativ unterschiedliche Skizzen entstehen lässt (Details, Größe der Skizze). Einige Aspekte, insbesondere das Verhältnis des Reflektierens und der Externalisierens, werden durch das Medium jedoch offenbar nicht verändert.

7.1 Hypothesen

In Hypothese 1 wurde postuliert, dass immersive virtuelle Medien aufgrund ihrer zusätzlichen Freiheitsgrade geeignet sind, kreative Entwurfsprozesse zu unterstützen (Abschnitt 6.3, S. 137). Diese Hypothese wurde anhand dreier Unterhypothesen untersucht. Dazu wurde als kreativer Entwurfsprozess exemplarisch das Skizzieren neuartiger Möbelstücke herangezogen. Die Untersuchung des Unterstützungspotenzials erfolgte anhand der Eigenschaften des Skizzierprozesses, der entstandenen Skizzen und der Lösungsgüte der Entwürfe:

Hypothese 1.1: Bei der Externalisierung innerer Bilder in ein immersives dreidimensionales Skizziermedium sind weniger mentale und motorische Transformationen notwendig als bei einer Projektion auf zweidimensionale Flächen (wie beispielsweise Papier). Daher können innere Bilder mittels immersiver dreidimensionaler Medien (beispielsweise VR) direkter und zufriedenstellender externalisiert werden als auf zweidimensionalen Ebenen (beispielsweise Papier).

Hypothese 1.2: Der zwei- und der dreidimensionale Raum sind verschiedene Medien. Werden sie als Skizziermedium verwendet, so entstehen qualitativ unterschiedliche Skizzen in Bezug auf den kreativen Wert des skizzierten Objekts (Produkts) und der enthaltenen Funktions- und Wirkprinzipien, sowie in Bezug auf den kreativen und ästhetischen Wert der Skizze (Zeichnung) und der darin enthaltenen Abstraktionsebenen.

Hypothese 1.3: Der Skizzier- und Lösungsfindungsprozess wird durch die Änderung der Freiheitsgrade des Skizziermediums ebenfalls geändert.

7.2 Interaktionstechniken

Die Studie wurde in einer VR-CAVE, einer immersiven VR-Umgebung mit fünf Rückprojektionsfächen, ausgerichtet (Abschnitt 4.3.2, Abbildung 26, S. 74). Zur Durchführung der Studie wurde ein immersives 3D-Skizziersystem entwickelt, das in der eingesetzten Version linienbasiertes Skizzieren unterstützte (Anhang 12.1, S. 274). Position und Orientierung (Pose; vgl. DIN EN ISO 8373), sowohl der Anwender als auch der Skizzierwerkzeuge, wurden mittels eines magnetischen Trackingsystems ermittelt (Abschnitt 4.3.2, S. 72; als Trackingsystem wurde ein Ascension MotionStar-System verwendet). Da dieses System aufgrund systemimmanenter Eigenschaften und ungünstiger Umgebungsbedingungen, insbesondere metallischer Objekte, stark verzerrte und verrauschte Positionsdaten ermittelte, wurden diese zur Laufzeit entzerrt und geglättet (Anhang 12.5.4, S. 289). Die Möglichkeiten, mit dem System gerade und glatte Linien zu zeichnen, wurden dadurch wesentlich verbessert.

Um die Interaktionstechniken möglichst ähnlich zum papierbasierten Skizzieren zu gestalten, wurde als Interaktionswerkzeug ein Stift gewählt (vgl. Abbildung 50). Der 3D-Skizzierprototyp verfügte neben dem linienbasierten Skizzieren auch über eine „Rückgängig" Funktion (engl. *undo, history).*

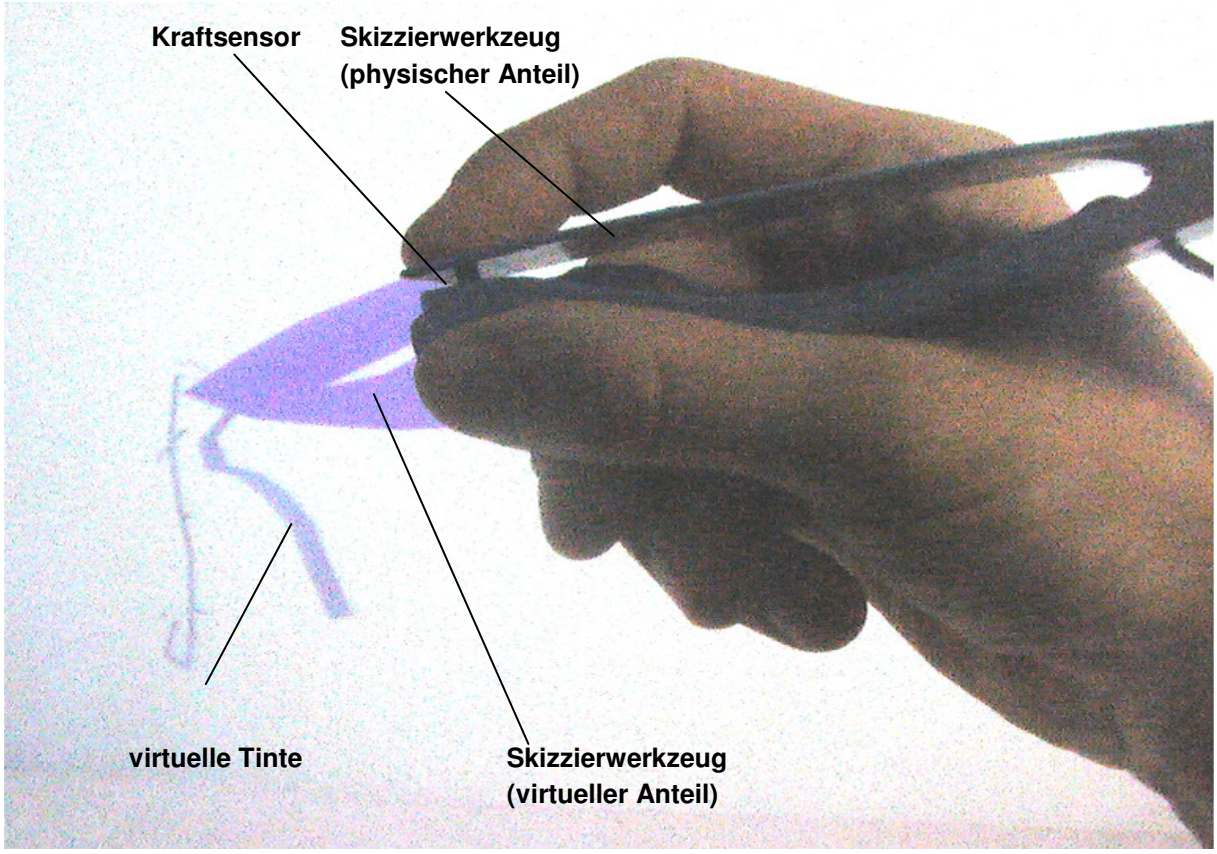


Abbildung 50: Hybrides Skizzierwerkzeug während des Zeichnens.

Um zu zeichnen, musste auf die obere Seite des Stiftes ein leichter Druck ausgeübt werden, bis obere und untere Seite des Stifts aufeinander trafen und ein passives Berührungsfeedback spürbar wurde. Durch diese Gestaltung des Stiftes sollte das Feedback nachempfunden werden, das beim Aufsetzen eines Stifts auf ein Blatt Papier auf fester Unterlage entsteht. Im Fall des Interaktionswerkzeugs wurde das Feedback jedoch aus dem Werkzeug heraus erzeugt, während es beim analogen Skizzieren durch die Gegenkraft des Mediums generiert wird. Im Moment der Berührung eines im unteren Teil des Stiftes angebrachten Kraftsensors, wurde „virtuelle Tinte“ im dreidimensionalen Raum abgetragen. Passives haptisches Feedback und Zeichnen der Linie konnten so vom Benutzer als zusammengehörig empfunden und eine Verbindung zwischen dem Gebrauch des greifbaren, physischen Stifts sowie seiner Wirkung im virtuellen Raum hergestellt werden. Die „virtuelle Tinte“ hatte die Form eines blauen Streifens, ähnlich der Spur eines „Textmarkers“. Die Breite des Striches wurde in Abhängigkeit von der Kraft, mit der die Benutzer auf den oberen Bogen des Stiftes drückten, zwischen einem und acht Millimeter skaliert. Der verwendete Kraftsensor entstammte dem Phidgets-Toolkit und konnte die einwirkende Kraft in 1024 Abstufungen diskriminieren (vgl. Phidgets, 2007).

In einem Vortest mit drei Personen wurde ermittelt, wie der zu verwendende Stift gestaltet sein sollte (ausführlich wird diese Frage in Studie 4, Kapitel 9, untersucht). Im Vergleich zu einem gänzlich physisch gestalteten und einem gänzlich virtuell gestalteten Stift präferierten die drei Teilnehmer einen Stift in hybrider Form (vgl. Abbildung 50). Die „virtuelle Tinte“ wurde hier

direkt an der Spitze des hybriden Stiftes abgetragen und folgte der Bewegung des Stiftes (und der Hand des Benutzers).

Über die Betätigung eines einfachen physischen Schiebereglers war es möglich, die Striche der Skizze sequentiell zu entfernen (Undo-Funktion). Wurde derselbe Schieberegler in die entgegengesetzte Richtung geschoben, erschienen die gelöschten Skizzenelemente wieder (Redo-Funktion). Indem der Schieberegler abwechselnd in beide Richtungen geschoben wurde, konnte der Entstehungsprozess der Skizze veranschaulicht werden (Replay-Funktion).

Das experimentelle Design der Studie sah eine 3D-Bedingung (3 Freiheitsgrade[1], engl. degree of freedom, DOF) und eine 2D-Bedingung (2 DOF) vor, mittels derer die Freiheitsgrade des Externalisierungsmediums variiert werden sollten:

- In der 3D-Bedingung war es den Teilnehmern gestattet, den gesamten dreidimensionalen Raum der CAVE zum Skizzieren zu nutzen (Kantenlänge 2,5 m, Volumen ca. 16 m^3)

- In der 2D-Bedingung wurden die Teilnehmer sowohl schriftlich als auch mündlich instruiert, auf einer imaginierten Wand im Zentrum der CAVE zu skizzieren (Kantenlänge 2,5 m, Fläche ca. 6 m^2). Die Teilnehmer wurden darüber informiert, dass das System sie nicht daran hindern würde, dreidimensional zu skizzieren, sondern dass es in ihrer Verantwortung lag, zweidimensional zu skizzieren.

Die 2D-Bedingung wurde in derselben technischen Umgebung wie die 3D-Bedingung realisiert, d. h. es wurden keine physischen Papierwände oder transparente Skizzierflächen innerhalb der CAVE installiert. Mit diesem Versuchsdesign konnte eine hohe Übereinstimmung zwischen den Versuchsbedingungen hinsichtlich der folgenden Faktoren erreicht werden:

- Technische Faktoren: Die technischen Störvariablen konnten konstant gehalten werden, namentlich Kalibrierungsfehler, Bildwiederholrate, visuelle Auflösung, Helligkeit und Kontrast, Verdeckungen zwischen Benutzer, Skizze und Skizzierwerkzeug, erweiterte Schärfentiefe, Akkommodations-Konvergenz-Konflikt und Akkommodationsversatz (Abschnitt 4.4.1, S. 85)

- Benutzerbezogene Faktoren / Erfahrung: Die Teilnehmer sollten möglichst wenig Vorerfahrung in die 2D-Bedingung einbringen können. Stattdessen sollte diese Bedingung ebenso artifiziell wie die 3D-Bedingung gestaltet werden, um den Lernaufwand in beiden Bedingungen gleich hoch zu halten.

- Benutzerbezogene Faktoren / Aufmerksamkeit: Da das Forschungsinteresse der Untersuchung auf den Auswirkungen eines dritten Freiheitsgrades auf den Skizzierprozess lag, wurde in der 2D-Bedingung kein aktives haptisches Feedback (engl. *force feedback*) implementiert. Die sensumotorische Koordinierung des dritten Freiheitsgrades beansprucht im Vergleich zu zwei Freiheitsgraden zusätzliche Aufmerksamkeitsressourcen des Anwenders. Daher würde eine haptische Unterstützung in der 2D-Bedingung Aufmerksamkeitsressourcen freisetzen, die vermutlich der Lösung der Aufgaben (des Gesamtproblems, Abschnitt 4.2, S. 67) zugeteilt würden. Haptisches Feedback würde somit die Ergebnisse der Studie verzerren und es er-

[1] Vereinfachend werden hier nur translatorische Freiheitsgrade benannt (vgl. Abschnitt 3.2.6, S. 55).

schweren, die Untersuchungsergebnisse auf die variierte Versuchsbedingung (2 DOF, 3 DOF) oder die haptische Unterstützung zurück zu führen.

Während der gesamten Studie standen den Teilnehmern auf einem Tisch unmittelbar neben der VR-CAVE Papier und Bleistift zur Verfügung, die sie jederzeit verwenden konnten. Hiermit sollte Hinweise darauf gewonnen werden, ob die Teilnehmer herkömmliche Skizzen anstelle oder komplementär zu den Skizziertechniken des Versuchs einsetzen würden.

7.3 Erhebungs- und Bewertungsmethoden

7.3.1 Benutzerbezogene Fragebögen

Vor jeder Untersuchung füllten die Teilnehmer einen Fragebogen aus, der sowohl persönliche Daten als auch persönliche Vorerfahrung im Skizzieren, Erfahrung mit VR-Systemen, 3D-Umgebungen und CAD-Software erfragte (Anhang 12.8.1, S. 308).

Nach jeder Aufgabe füllten die Teilnehmer zwei weitere Fragebögen aus. Darin wurden sie

1. zum Skizzierprozess und
2. zu hedonistischen und pragmatischen Eigenschaften der Interaktionstechnik

befragt.

Das Ziel des ersten, selbstentwickelten Fragebogens war es, die Benutzerzufriedenheit, die geistige und körperliche Beanspruchung bei der Lösung der Aufgabe, die Eigenschaften des Skizzierprozesses nach Buxton (vgl. Tabelle 1, Abschnitt 2.1.2, S. 17) sowie die Funktion des Skizzierens als Gedächtnisunterstützung und Externalisierungshilfe zu erfassen. Die Benutzerantworten zum Skizzierprozess wurden nach jeder Aufgabe auf dem selbstentwickelten Fragebogen erhoben. Je Kategorie wurde jeweils ein Item mit einer fünffach gestuften Skala verwendet. Weiterhin enthielten diese Fragebögen offene Fragen zu den subjektiv wahrgenommenen Vor- und Nachteilen der Bedingungen sowie zu einem Vergleich mit herkömmlichem Skizzieren auf Papier.

Als zweite Erhebungsmethode wurde der AttrakDiff-Fragebogen eingesetzt (vgl. Hassenzahl, 2004; Hassenzahl et al., 2003). Dieser Fragebogen geht über herkömmliche Usability Fragebögen hinaus, indem er nicht nur die Benutzerwahrnehmung der Gebrauchstauglichkeit in Bezug auf die *pragmatische*, funktionale Qualität (PQ) erfasst. Er ermöglicht auch, *hedonistische* Qualitäten eines interaktiven Produkts, namentlich die *Stimulation* durch das Produkt (HQ-S), die *Identifikation* mit dem Produkt (HQ-I) und die *Attraktivität* des Produkts (ATTR), zu erfassen. Die Stimulation wird hier auf die menschlichen Bedürfnisse bezogen, die eigene Persönlichkeit und eigene Fertigkeiten zu entwickeln, sowie Wissen zu erweitern. Unter Identifikation wird in diesem Kontext das menschliche Bedürfnis verstanden, sich mit Hilfe von Objekten darzustellen und mit anderen zu kommunizieren. Diese menschlichen Wünsche und Bedürfnisse spielen eine wesentliche Rolle für das Gesamterleben eines Produkts oder, wie im Fall dieser Studie, einer Interaktionstechnik. Der AttrakDiff-Fragebogen besteht aus sieben Items mit siebenstufigen bipolaren verbalen Ankern für jede Attributklasse (sog. semantisches Differential). Die Unabhängigkeit der Attributegruppen konnte durch eine Faktorenanalyse gezeigt werden (vgl. Hassenzahl et al., 2003). Semantische Differenziale sind weit verbreitete Varianten von Ratingskalen. Es wird da-

von ausgegangen, dass sie metrisch bzw. intervallskaliert sind und mittels parametrischer Testmethoden ausgewertet werden können (Bortz & Döring, 2006, S. 180f; Baker et al., 1966).

Am Ende jedes Experiments wurden die Teilnehmer mittels des 3D-Würfeltests (3DW) auf ihr räumliches Vorstellungsvermögen getestet (vgl. Gittler, 1990).

7.3.2 Beobachtung des Benutzerverhaltens

Die Versuche wurden, wenn die Teilnehmer dem zustimmten, auf Videobänder aufgezeichnet. Während aller Untersuchungen wurden besondere Ereignisse, verbale Kommentare und unerwartete Handlungen der Versuchsteilnehmer durch die Versuchsleiter handschriftlich protokolliert.

7.3.3 Aufzeichnung des Benutzerverhaltens

Basierend auf den Daten des elektromagnetischen Trackings und der Sensorik der Interaktionsgeräte, hier des Kraftsensors und des physischen Schiebereglers, wurde automatisch eine Log-Datei erstellt. Diese enthielt folgende Informationen:

- *Dauer der aktiven Skizzierhandlungen*: Die Summe der Zeitspannen, in denen der Stift tatsächlich genutzt wurde, um zu zeichnen, d. h. in denen auf den Stift „gedrückt" wurde. Dieser Zeitraum wurde vereinfachend als Externalisierungszeitraum angesetzt, in dem die Teilnehmer innere Bilder in das äußere Medium übertrugen.

- *Gesamtdauer des Skizzierprozesses*: Der Zeitraum zwischen der ersten und letzten Skizzierhandlung. Dieser Zeitraum umfasst demnach sowohl die Zeit, in der skizziert wurde (Externalisierungszeitraum, s. o.), als auch die Zeit, in der die Skizzen betrachtet wurden (Reflektionszeitraum).

- *Verhältnis Gesamtdauer/aktive Skizzierdauer*: Nachträglich wurde das Verhältnis aus Externalisierungszeitraum und Reflektionszeitraum bestimmt.

- *Geschwindigkeit der Benutzerbewegungen*: Die Geschwindigkeit, mit der sich die Teilnehmer bewegten, wurde mittels des magnetischen Sensors gemessen, der an der Shutterbrille angebracht war, welche die Benutzer während der Versuche trugen.

7.3.4 Methoden zur Bewertung der Skizzen (nicht lösungsbezogen)

Um die Qualität der Skizzen unabhängig von ihrer inhaltlichen Lösungsgüte im Nachgang der Studie bewerten zu können, wurde ein Bewertungsbogen entwickelt (Anhang 12.8.3, S. 327). Dessen Kategorien *Kreativität* und *Perspektive* wurden in Anlehnung an den „Test zum schöpferischen Denken – Zeichnerisch" (TSD-Z, Abschnitt 3.2.5, S. 53) von Urban & Jellen (1995) definiert. Da dieser Test die Bewertung des kreativ-schöpferischen Denkens anhand von Skizzen der Probanden vornimmt, bietet er indirekt auch ein Messinstrument zur Bestimmung des kreativen Wertes der Skizzen. Die Kategorie *Abstraktion* des Bewertungsbogens wurde in Anlehnung an die Abstraktionsebenen von Skizzen nach Pache (2005) definiert. Pache konnte in experimentellen Untersuchungen aufzeigen, dass je mehr verschiedenartige Elemente in einer Skizze enthalten sind, desto stärker deren Unterstützungsfunktion und Informationsgehalt für den weiteren Konstruktionsprozess sind (Abschnitt 2.1.2, S. 17).

Die Skizzen wurden anhand der Kriterien visuell bewertet, dazu wurden den Bewertern die Skizzen auf einem Bildschirm präsentiert. Die Abmessungen der VR-CAVE wurden als Hilfslinien eingeblendet. Um die Skizzen aus verschiedenen Perspektiven bewerten zu können, wurde die Szene in einer Animation automatisch um den CAVE-Mittelpunkt rotieren gelassen. Es wurden erfasst:

- *Kreativität*:[1] Der kreative Wert einer Skizze wurde anhand der in der Skizze enthaltenen Bildelemente ermittelt. Je vorhandenem Objekt und Verbindungselement wurde ein Punkt gegeben. Enthielt die Skizze beispielsweise eine Couch, einen Tisch und einen angedeuteten verbindenden Teppich, entsprach dies drei Punkten in dieser Kategorie. Mit dieser Kategorie wurden die „Daten, Elemente und Strukturen (...) einer neuen Lösungsgestalt" (Urban, 2004, S. 138) ermittelt, ohne sie zu interpretieren. Der *kreative Wert* des entworfenen Produkts wurde erst später in der Expertenbewertung bestimmt (Abschnitt 7.3.5, S. 150).

- *Perspektive*:[2] Der Grad der perspektivischen Darstellung:

  a) Einzelne Elemente, bei denen die Perspektive oder der Versuch einer dreidimensionalen Darstellung erkennbar war, wurden mit je einem Punkt bewertet (z. B. wenn zwei Seiten eines Möbelstücks dargestellt waren, deutlich hintereinander befindliche Figuren oder ein sich in der Tiefe verengender Untergrund erkennbar war oder Horizontlinien verwendet wurden).

  b) Waren mehrere Elemente/Figuren perspektivisch dargestellt, wurden maximal zwei Punkte vergeben.

  c) Für eine perspektivische Gesamtkomposition wurden sechs Punkte vergeben.

  Dieses Bewertungsschema wurde sowohl für Skizzen der 2D- als auch der 3D-Bedingung angewendet. Waren in der 3D-Bedingung nur hintereinander gesetzte „Scheiben" ohne die in a) genannten Eigenschaften zu erkennen, wurden hierfür keine Punkte vergeben.

- *Abstraktion*:[3] Der Abstraktionsgrad erfasste, ob visuell-grafische, schematische, symbolische und verbale Elemente in der Skizze enthalten waren (in Anlehnung an Pache, 2005). Für das Vorhandensein jeder Abstraktionsstufe wurde je ein Punkt vergeben.

- *Proportionalität*: Mit diesem Faktor wurde erfasst, ob die Elemente der Skizze (annährend) im Maßstab eins-zu-eins gezeichnet wurden, d. h. die skizzierten Möbelstücke eine Größe hatten, die auf die Größe des menschlichen Körpers abgestimmt war. Dieses Kriterium wurde visuell unter Zuhilfenahme der Daten des Skizzenvolumens ausgewertet.

- *Lösungsvarianten*: Die Anzahl der für die Lösung einer Aufgabe erstellten Lösungsvarianten (es konnten mehrere Lösungen auf einer Skizze dargestellt werden).

---

[1] Die Kategorie *Kreativität* wurde in Anlehnung an die TSD-Z-Kategorien „Neue Elemente - Ne" und „Verbindungen, zeichnerisch - Vz" definiert (vgl. Urban & Jellen, 1995; Urban, 2004).

[2] Die Kategorie *Perspektive* wurde in Anlehnung an die TSD-Z- Kategorie „Perspektive - Pe" definiert (vgl. Urban & Jellen, 1995; Urban, 2004).

[3] Die Kategorie *Abstraktion* entspricht neben den Kategorien von Pache (2005) zum Teil der TSD-Z-Kategorie „Unkonventionalität - Ukc: Verwenden von Zeichen oder Symbolen" (vgl. Urban & Jellen, 1995; Urban, 2004).

In einem nachträglichen Prozess wurden anhand der erstellten Skizzen weiterhin ermittelt:

- *Skizzenvolumen*: Hierzu wurden zunächst der Mittelpunkt der Skizze bestimmt und anschließend 90 Prozent (a=0,9) der Skizzenelemente (Eckpunkte der Skizzenelemente, engl. vertices) in die Berechnung des die Skizze umschließenden Würfels (engl. *bounding box*) einbezogen. Somit konnten versehentlich erstellte Punkte ausgeschlossen werden. Das Volumen des Würfels wurde als Skizzenvolumen angesetzt. Alle Skizzen und umschließenden Würfel wurden visuell auf Plausibilität untersucht, ggf. wurde die Ausschlussschwelle a manuell auf Werte zwischen 0,80 und 0,99 angepasst.

  Das Skizzenvolumen wurde auch in der 2D-Bedingung bestimmt um zu ermitteln, ob die Teilnehmer entgegen der Instruktionen auch in der 2D Bedingung dreidimensionale Skizzen anlegten.

- *Skizzenfläche*: Aufgrund der Aufgabenstellung konnte in der 3D-Bedingung ein wesentlich größeres Skizzenvolumen erwartet werden als in der 2D-Bedingung. Daher wurde als ein weiteres Maß die Skizzenfläche bestimmt. Dazu wurde die Fläche der größten Seite des die Skizze umschließenden Quaders bestimmt, dieses Maß gibt den Grad der räumlichen Ausnutzung der VR-CAVE unabhängig von den in der Bedingung zur Verfügung stehenden räumlichen Freiheitsgraden (DOF) an.

- *Detailliertheit der Skizze*: Die Anzahl der in einer Skizze enthaltenen Linieneckpunkte wurde als deren Detailliertheitsgrad angesetzt. Dieses wurde automatisiert bestimmt, indem die Anzahl der in den exportieren Skizzendateien[1] enthaltenen Eckpunkte gezählt wurde. Eine inhaltliche Analyse beispielsweise nach Anzahl der enthaltenen Baugruppen und Bauteile erfolgte nicht.

7.3.5 Expertenbewertung der Skizzen (skizzen- und lösungsbezogen)

Im Nachgang des Experiments wurden in einer Expertenbewertung weitere Variablen zur inhaltlichen und ästhetischen Güte der Skizzen erhoben.

In zwei Vortests mit akademischen Experten (Hochschullehrern) wurden aufwändige Verfahren erprobt, die Skizzen im Sinne einer Nutzwertanalyse (vgl. u. a. Zangemeister, 1973) beziehungsweise anhand des in Abschnitt 3.2.5 (S. 53) vorgestellten Creative Product Semantic Scale (CPSS; vgl. Besermer & O`Quin, 1986) zu bewerten. Dieses Verfahren erwies sich jedoch als nicht durchführbar, da die für die Bewertung notwendigen Informationen, beispielsweise Kriterien der Ergonomie, Herstellbarkeit oder Gebrauchssicherheit, aus den Skizzen noch nicht abzulesen waren. Auch das Bilden von Rangreihenfolgen anhand von Papierausdrucken der erstellten Skizzen erwies sich als nicht praktikabel, da durch die Darstellung auf Papier der Informationsgehalt der Skizzen, die in der 3D-Bedingung erstellt wurden, wesentlich eingeschränkt wurde.

Daher wurde schließlich ein Verfahren angewendet, in dem die Skizzen einem Experten per großformatiger Videoprojektion vorgestellt wurden. Die Skizzen waren anhand eines Bogens mit fünf Kategorien zu bewerten, die sich an denen des CPSS orientierten, jedoch jeweils nur durch ein Item repräsentiert waren. Zur Bewertung der Skizzen wurden zusätzlich die Umrandungen

[1] Die Skizzen wurden in das Dateiformat VRML exportiert und gespeichert.

der CAVE maßstäblich eingeblendet, so dass eine Einschätzung der Skizzengröße möglich wurde. Auch wurde die Skizze wie oben beschrieben automatisch rotieren gelassen. Als Bewertungskategorien wurden angelegt:

- Bewertung des entworfenen Produkts:
  - die Erfüllung *allgemeiner Anforderungen*, bezogen auf die Aufgabe (beispielsweise das Funktions- und Wirkprinzip),
  - der *kreative Wert* des entworfenen Produkts; als Definition für „kreativ" wurden „neu, nützlich und brauchbar" vereinbart[1] (vgl. Dörner, 1999; Amelang & Bartussek, 1997).
- Bewertung der Skizze:
  - der *ästhetische Wert* der Skizze,
  - die *Skizzenhaftigkeit*; d. h. ob eine charakteristische Skizziersprache verwendet wurde, der Stil der Zeichnung als Skizze zu erkennen war und wenige Details verwendet wurden,
  - die *Mehrdeutigkeit (Ambiguität)*; d. h. ob während des Betrachtens der Skizze beim Betrachter innerlich Lösungsideen, Assoziationen, Verbindungen oder neue Lösungsvarianten entstehen.

Zunächst wurden dem Experten die Bewertungskriterien vorgelegt (Anhang 12.8.3, S. 327), Grenzfälle diskutiert und sichergestellt, dass er einheitliche Regeln für die Bewertung der Skizzen verwendet, die für alle Skizzen stabil angewendet werden.

Der akademische Experte, dessen Bewertung das Ergebnis der Expertenbefragung darstellt, verfügte über dreißigjährige Erfahrungen in den Bereichen Skizzieren und Technisches Zeichnen.

7.4 Teilnehmer

In der Einladung zur Teilnahme an der Studie waren mehrere Auswahlkriterien formuliert. Dazu gehörten eine mehrjährige Erfahrung als Innenarchitekt oder Designer im Bereich Möbeldesign oder ein begonnenes Studium eines dieser Fächer, weiterhin Erfahrung im Anfertigen von Skizzen, gutes räumliches Sehvermögen, Alter zwischen 25 und 50 Jahren und Deutschkenntnisse auf muttersprachlichem Niveau (letztere Einschränkung war aufgrund der eingesetzten Fragebögen, die ausschließlich in deutscher Sprache verfasst waren, nötig).

Die Rekrutierung der Teilnehmer erfolgte per E-Mail und telefonischer Akquise anhand von Branchenverzeichnissen. Die Teilnehmer der Fokusgruppen (Kapitel 5) wurden ebenfalls einge-

[1] Diese Definition stellt den „gemeinsamen Nenner" aller Definition dieses Begriffs dar (Abschnitt 3.2.1, S. 48). Auf eine ausführlichere Definition des Begriffs wurde nach den Erfahrungen der Vortests und auch deshalb verzichtet, da Experten in der Lage sind, eigene Kriterien der Beurteilung des kreativen Wertes von Produkten zu entwickeln. Sie bewerten dabei „die Distanz zwischen dem [zu bewertenden] Objekt und ihrer eigenen internen Repräsentation (...) einer prototypischen Lösung" (Christiaans, 1992, S. 51; vgl. auch Amabile, 1983; Christiaans, 2002; Brown, 2008). In empirischen Studien konnte Christiaans (2002) zeigen, dass in die Bewertung der Kreativität insbesondere die vom Experten empfundene Neuheit und Überraschung einfließt, was ebenfalls mit der hier verwendeten Definition übereinstimmt.

laden. Insgesamt nahmen 24 Teilnehmer an der Untersuchung teil, darunter 18 Männer und fünf Frauen. Das Durchschnittsalter lag bei 33 Jahren (*SD*=7,05). Von den Teilnehmern waren 15 berufstätig und hatten durchschnittlich 8,43 Jahre Berufserfahrung (*SD*=6,12). Sechs Teilnehmer waren Studenten mit einer durchschnittlichen Studiendauer von 3,33 Jahren (*SD*=1,63). Drei Teilnehmer beantworteten die entsprechende Frage nicht (missing data).

7.5 Experimentelle Skizzieraufgaben

In beiden Bedingungen wurde den Teilnehmern die Aufgabe gestellt, Möbel bzw. Einrichtungsgegenstände für die Eingangshalle des Produktionstechnischen Zentrums Berlin (PTZ), in dem die Versuche stattfanden, zu entwerfen (Anhang 12.8.1, S. 308). Für beide Aufgaben wurden möglichst ungewöhnliche Aufgabenstellungen gewählt, um über alle Teilnehmer, Versuchsbedingungen und Aufgaben hinweg einen möglichst gleich hohen Lösungsaufwand zu erzeugen. Die Aufgaben wurden so gewählt, dass sie im zur Verfügung stehenden Raum der CAVE lösbar waren.

Die erste Aufgabe bestand darin, Stehtische zu skizzieren, die von der Decke herabgelassen werden könnten, die elegant und futuristisch wirken, jedoch nicht "wackeln" sollten und an die man sich anlehnen können sollte (vgl. Abbildung 51, Abbildung 52).

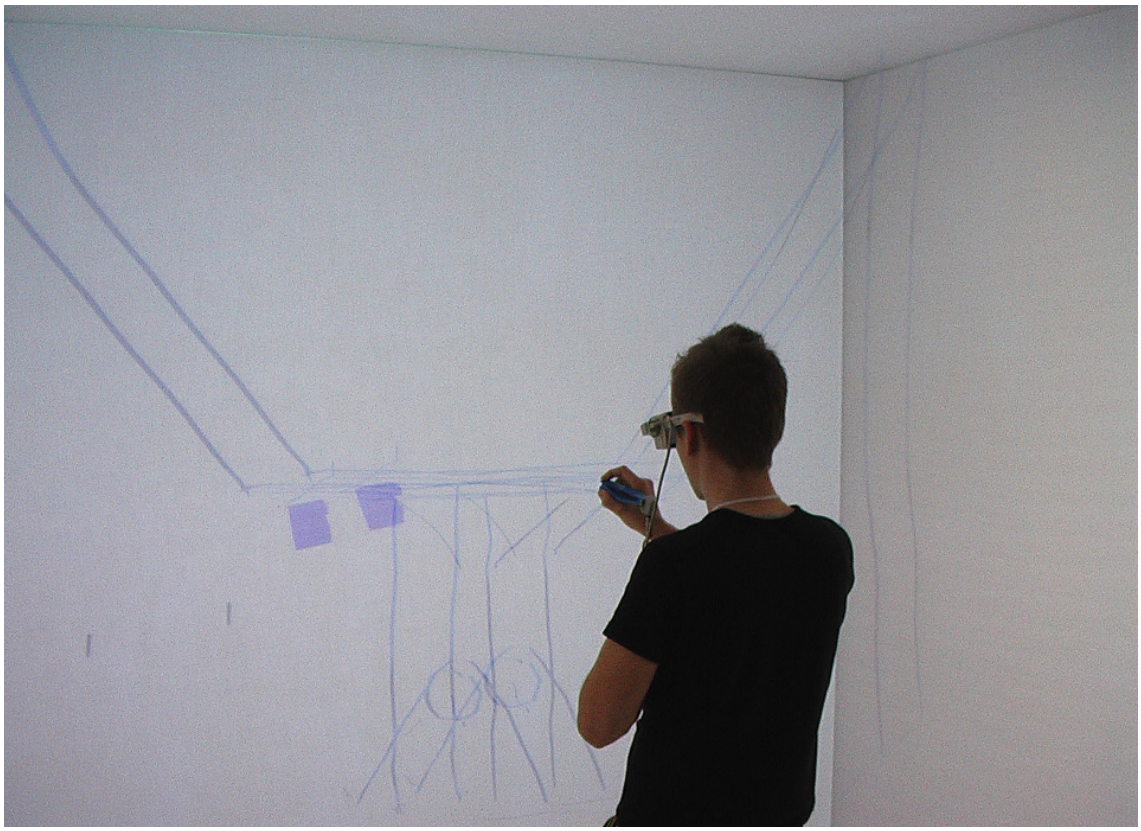


Abbildung 51: Teilnehmer während der ersten Aufgabe (herablassbarer Stehtisch, 2D-Bedingung).

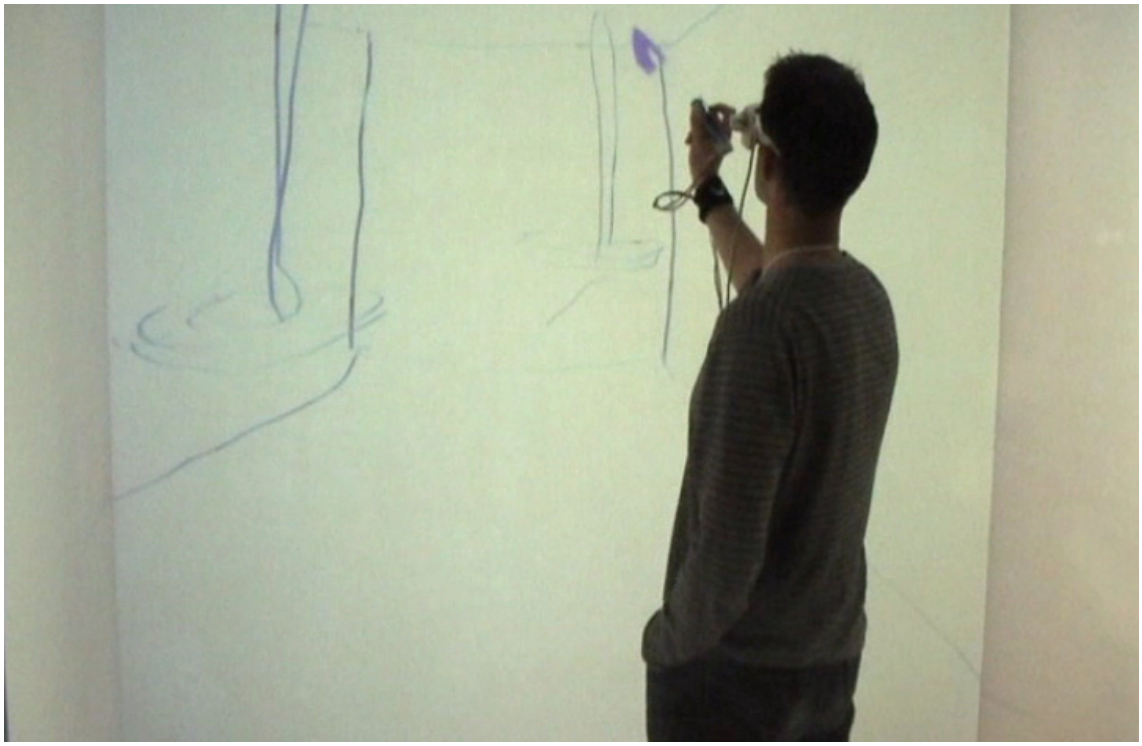


Abbildung 52: Teilnehmer während der ersten Aufgabe (herablassbarer Stehtisch, 3D-Bedingung).

In der zweiten Aufgabe sollte eine platzsparende Bar für das Foyer entworfen werden, die sich bei Empfängen zum Ausschank von Getränken nutzen ließe. Das Design der Bar sollte ebenfalls elegant und futuristisch sein. Wenn keine Empfänge stattfinden, sollte die Bar verschlossen werden können und möglichst dezent erscheinen (vgl. Abbildung 53 und Abbildung 54)**.**

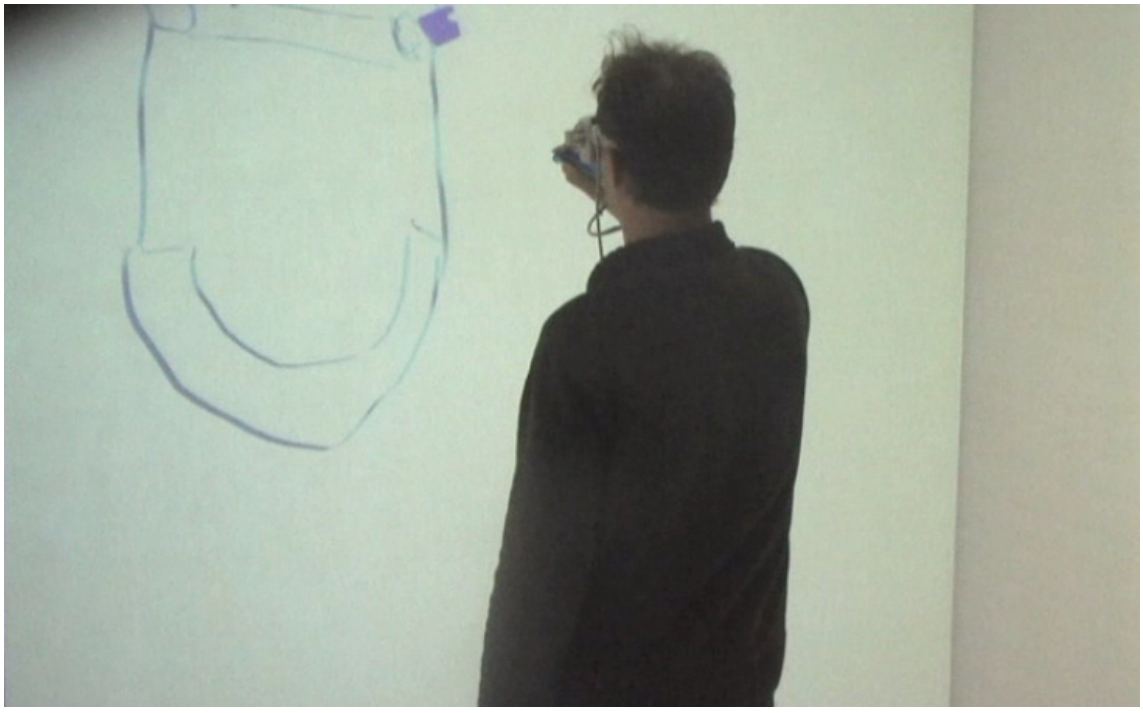


Abbildung 53: Teilnehmer während der zweiten Aufgabe (Bar, 2D-Bedingung).

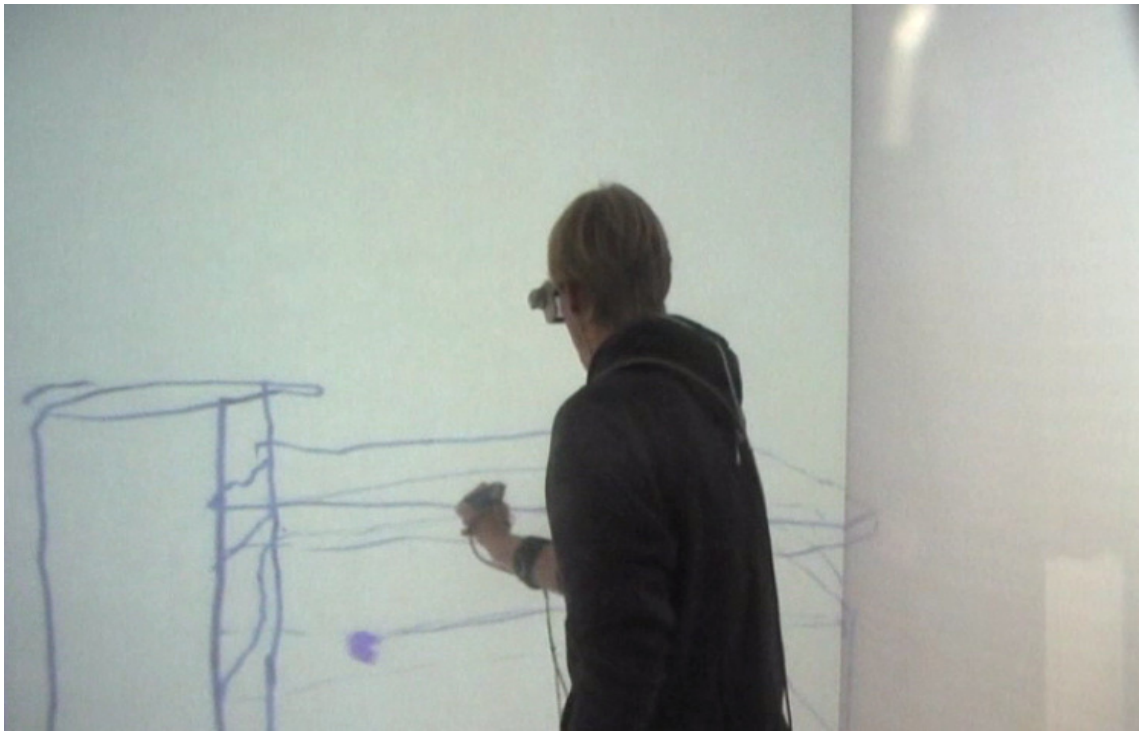


Abbildung 54: Teilnehmer während der zweiten Aufgabe (Bar, 3D-Bedingung).

Zu Beginn des Versuchs durchliefen die Teilnehmer eine Trainingsphase, in der sie sich mit dem immersiven dreidimensionalen Skizzieren vertraut machen sollten (vgl. Abbildung 55). Dazu wurden in der VR-CAVE geometrische Basisobjekte, ein Würfel, eine Kugel und eine Pyramide mit jeweils ca. 20 cm Kantenlänge bzw. Durchmesser eingeblendet, die die Teilnehmer im Abstand von ca. einem Meter abzeichnen sollten. Die dafür zur Verfügung stehende Zeit war nicht begrenzt, sondern die Teilnehmer sollten selbst entscheiden, wann sie sich für die Aufgaben bereit fühlten. Im Durchschnitt dauerte die Trainingsphase fünf Minuten.

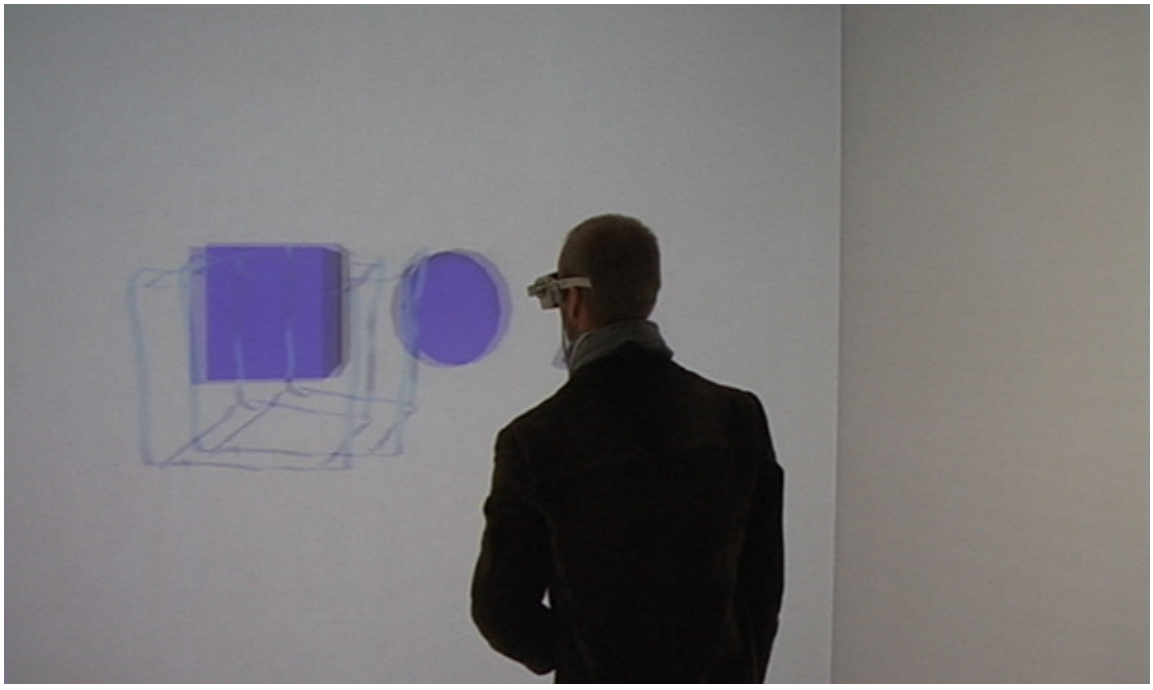


Abbildung 55: Teilnehmer während der Trainingsphase.

7.6 Design und Ablauf des Versuchs

Alle Teilnehmer durchliefen beide Aufgaben in derselben Reihenfolge, jedoch wurde die Reihenfolge der Versuchsbedingungen, namentlich die 2D- und 3D-Bedingung, zufällig variiert. Somit entstanden zwei gleich große Gruppen. Den Teilnehmer der ersten Gruppe (G1) wurde zuerst die Aufgabe 1 in der 2D-Bedingung gestellt, danach hatten sie die Aufgabe 2 in der 3D-Bedingung zu lösen. Die Teilnehmer der zweiten Gruppe (G2) mussten zuerst die Aufgabe 1 in der 3D-Bedingung und anschließend Aufgabe 2 in der 2D-Bedingung lösen (vgl. Tabelle 8). Dieses Versuchsdesign entspricht einem mehrfaktoriellen Versuchsdesign in der Variante eines lateinischen Quadrats. Die Versuchsbedingung ist ausbalanciert, da jede Faktorkombination der Faktoren *Dimension* und *Aufgabe* mit der gleichen Anzahl an Versuchsteilnehmern besetzt ist.

Tabelle 8: 2x2 faktorieller Versuchsplan der Studie.

	2D-Bedingung	*3D-Bedingung*
Aufgabe 1	Gruppe 1	Gruppe 2
Aufgabe 2	Gruppe 2	Gruppe 1

Lateinische Quadrate können angewendet werden, wenn man „theoretisch rechtfertigen kann oder aufgrund von Voruntersuchungen weiß, dass Interaktionen [zwischen den Faktoren] unwahrscheinlich sind“ (Bortz, 2005, S. 396). Mit anderen Worten dürfen keine Effekte aufgrund der spezifischen Kombinationen der Faktoren auftreten, d. h. beispielsweise dürfte keine der Aufgaben auf eine spezifische Versuchsbedingung zugeschnitten sein. Auch muss in einem unvollständigen Design ein Reihenfolgeneffekt ausgeschlossen werden, d. h. beispielsweise dürften keine Effekte durch die Reihenfolge der Handhabung einer Interaktionstechnik (erst 3D- und dann 2D-Bedingung oder erst 2D, dann 3D-Bedingung) auftreten. Schließlich sollten auch Zufallseffekte (engl. *random effects*) ausgeschlossen werden. Dies sind Effekte, die durch die Versuchsplanung nicht beeinflusst werden können, wie beispielsweise die zufällige Verteilung der Teilnehmer auf die beiden Gruppen und die sich dadurch zufällig ergebenden Erfahrungsverteilungen in beiden Gruppen.

Obwohl wegen der ähnlichen Formulierung der Aufgaben keine Effekte aufgrund der Aufgaben und keine Interaktionseffekte zwischen Aufgabe und Freiheitsgrad zu erwarten waren, wurden diese in der Auswertung mittels Gemischter Linearer Modelle (GLM, Abschnitt 7.7, S. 156) überprüft. Entgegen der Annahme wurden einige Aufgaben- und Interaktionseffekte gefunden, die in den Ergebnissen berichtet werden.

Um den Einfluss von sozialen Störvariablen auf das Ergebnis zu minimieren, wurden die experimentellen Aufgaben seitens der Versuchsleiter ohne jegliche Präferenz zugunsten einer der Bedingungen präsentiert. Da beide Bedingungen in der gleichen technischen Umgebung stattfanden, kann davon ausgegangen werden, dass die Neuheit des verwendeten CAVE-Systems in beiden Bedingungen einen gleich hohen Einfluss auf die Einschätzung der Benutzer gehabt hat.

7.7 Auswertungsmethode

Zur Hypothesenüberprüfung haben sich in den Human- und Sozialwissenschaften, und insbesondere auch in der empirischen Usabilityforschung, vielfältige Erhebungs- und Auswertungsmethoden etabliert. Dabei verlangt „jede empirische Frage eine für sie typische empirische Vorgehensweise“ (Bortz & Döring, 2006, S. 17).

Statistische Hypothesenprüfung für quantitative Untersuchungen erfolgt in der Regel mittels Signifikanztests. Diese dienen zur Berechnung der Irrtumswahrscheinlichkeit, d. h. des Wahrscheinlichkeitswerts, mit dem davon ausgegangen werden kann, dass die Hypothese (bzw. die gegenteiligen Nullhypothese) in der Population gilt. Als Signifikanzschwelle gilt allgemein eine 5%-Hürde der Irrtumswahrscheinlichkeit als akzeptiert (diese wird als $p < 0{,}05$ notiert). In besonderen Fällen werden auch geringere Grenzen wie 1% ($p < 0{,}01$) oder 0,1% ($p < 0{,}001$) angelegt (vgl. Bortz & Döring, 2006, S. 494). Ergebnisse, die unter einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 10% ($p < 0{,}1$) liegen, werden teilweise als „tendenziell signifikant“ berichtet, haben jedoch keine Auswirkung auf die Interpretation der Hypothesen.

Aufgrund des verwendeten Versuchsdesigns (lateinisches Quadrat, Abschnitt 7.6, S. 155) mussten zur Auswertung der Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung Methoden herangezogen werden, die robust gegenüber Einflüssen durch Interaktionen der Faktoren, Reihenfolgeneffekte und Zufallseffekte sind. In der Literatur werden hierzu Gemischte Lineare Modelle (GLM, engl. linear mixed models) vorgeschlagen (vgl. u. a. Diggle et al., 1994; Verbeke & Molenberghs, 2000; Garson, 2008; Fox, 2002). Diese unterscheiden sich gegenüber anderen Signifikanztests dadurch, dass sie sowohl die Gruppenzugehörigkeit der Probanden als auch Interaktionen zwischen den Faktoren und zufällige Effekte in die Berechnung der Irrtumswahrscheinlichkeit einbeziehen (Anhang 12.6.2, S. 292).

Zur Auswertung dieser Untersuchung wurden daher Paarvergleiche anhand Gemischter Linearer Modelle durchgeführt, wobei die Teilnehmer (aufgrund ihres variierenden spezifischen Vorwissens und ihrer Fähigkeiten) als Zufallsfaktoren (engl. *random factor*) behandelt wurden und die „räumlichen Freiheitsgrade“ (DOF: 2D, 3D) als fester Faktor (engl. *fixed factor*) einflossen (vgl. Tabelle 9, Anhang 12.6.2, S. 292). Als zusätzliche feste Faktoren wurden auch die Aufgaben (Aufgabe 1, Aufgabe 2) und die Interaktion der Faktoren „Freiheitsgrad“ und „Aufgabe“ in das Modell aufgenommen, um zu untersuchen, ob mögliche Effekte dadurch erklärt werden können (d. h. ob diese Faktoren signifikant werden). Diejenigen Haupteffekte, bei denen eine signifikante Interaktion zwischen den Faktoren ermittelt wurde, wurden auf den Trend der Interaktion untersucht. Nur solche Haupteffekte, die den gleichen Trend aufwiesen, wurden interpretiert (vgl. ordinale Interaktion, Bortz, 2005, S. 301).

Die Auswertung wurde mit dem Programm SPSS[1] Version 17.0 vorgenommen. Die Effektgrößen η^2 (d. h. die Varianzaufklärung) wurden nach Haase (1983) berechnet.

[1] SPSS: Statistical Package for the Social Sciences (statistische Analysesoftware der SPSS Inc.)

Tabelle 9: Faktoren des Gemischten Linearen Modells.

Feste Effekte	Aufgabe
	Räumlicher Freiheitsgrad
	Aufgabe x Freiheitsgrad
Zufallseffekte	Gruppenzugehörigkeit der Versuchsteilnehmer

Da gemischte lineare Modelle nur für metrische Daten[1] definiert sind, wurden für alle ordinal skalierten Merkmale Wilcoxon-Signed-Ranks-Testverfahren zur Auswertung angewendet (Anhang 12.6.1, S. 291).

Die Auswertung der offenen Antworten des Fragebogens und Quantifizierung der enthaltenen Aussagen wurde im Rahmen einer Inhaltsanalyse nach Mayring (2003) durchgeführt. Hierzu lasen drei Personen (Kodierer) die Antworttexte und entwickelten daraus ein Kodierschema, das auf alle drei Fragen angewendet werden konnte. In einem zweiten Schritt wurde das Kodierschema am Material getestet. Schließlich erfolgte die Auswertung des gesamten Materials anhand des verifizierten und überarbeiteten Kodierschemas. Insgesamt enthielt dieses Schema sechs Kategorien, welche jeweils aus mehreren Subkategorien bestanden (Anhang 12.8.4, S. 329). Weiterhin erhielt jede Kategorie eine positive oder negative Valenz, welche sich auf die Bewertung der Skizzierbedingung bezog. Um zu überprüfen, ob sich die Anzahl der Nennungen in den 2D- und 3D-Bedingungen unterscheiden, wurde ein McNemar-χ^2-Test durchgeführt (Anhang 12.6.1, S. 291).

7.8 Ergebnisse – Prozesseigenschaften (Skizzieren)

7.8.1 Benutzerverhalten: Skizzierdauer, Stiftgebrauch und Benutzergeschwindigkeit

Dauer der aktiven Skizzierhandlungen: Der Zeitraum, in dem die Teilnehmer aktiv skizzierten (d. h. mit dem Stift zeichneten) war in der 3D-Bedingung um 37 Prozent länger als in der 2D-Bedingung (M_{3D}=4,96 min, SD_{3D}=2,17; M_{2D}=3,64 min, SD_{2D}=2,56; vgl. Abbildung 56). Die Auswertung des GLM ergab, dass diese Effekte sowohl auf den Faktor der räumlichen Freiheitsgrade ($F_{DOF}(1, 19{,}996)=6{,}653$, $p_{DOF}=0{,}018$, $\eta^2_{DOF}=0{,}2366$) als auch auf die Aufgabe zurückgeführt werden können ($F_{AUF}(1, 19{,}996)=4{,}352$, $p_{AUF}=0{,}050$, $\eta^2_{AUF}=0{,}1340$). Ebenfalls signifikant wurde der Einfluss des Zufallsfaktors (hier die Gruppenzugehörigkeit der Teilnehmer; *Wald Z*=2,393, p=0,013). Eine Interaktion zwischen beiden Faktoren bestand dagegen nicht ($F_{DOFxAUF}(1, 20{,}792)=1{,}649$, $p_{DOFxAUF}=0{,}239$, $\eta^2_{DOFxAUF}=0{,}0660$). Der Faktor Freiheitsgrad ist

[1] Merkmale mit Intervall- oder Verhältnisskalenniveau werden als *metrisch* bezeichnet, der Abstand zweier Werte ist hier über ihre *Differenz* definiert. Nominal und ordinal skalierte Merkmale werden als *kategorial* bezeichnet (Anhang 12.6.1, S. 288).

daher mit einem Anteil von 24 Prozent der Varianzaufklärung am bedeutendsten für den beschriebenen Effekt.

▷ Die Teilnehmer skizzierten in der 3D-Bedingung ca. 33% länger als in der 2D-Bedingung.

Gesamtdauer des Skizzierprozesses: Im Durchschnitt nutzten die Teilnehmer das System in der 3D-Bedingung 50 Prozent länger als in der 2D-Bedingung (M_{3D}=13,38 min, SD_{3D}=5,54; M_{2D}=8,97 min, SD_{2D}=5,26; vgl. Abbildung 56). Die Auswertung des GLM ergab, dass diese Effekte auf den Faktor der räumlichen Freiheitsgrade zurückgeführt werden können (F_{DOF}(1, 20,252)=12,188, p_{DOF}=0,002, η^2_{DOF}=0,3753), wohingegen weder die Aufgabe noch die Interaktion zwischen Aufgabe und Bedingung einen signifikanten Effekt hatten (F_{AUF}(1, 20,252)=1,255, p_{AUF}=0,276, η^2_{AUF}=0,037; $F_{DOFxAUF}$(1, 21,071)=0,032, $p_{DOFxAUF}$=0,859, $\eta^2_{DOFxAUF}$=0,0015). Erneut wurde der Einfluss des Zufallsfaktors signifikant (*Wald Z*=2,116, p=0,034). Der Faktor Freiheitsgrad ist daher mit einem Anteil von 38 Prozent der Varianzaufklärung am bedeutendsten für den beschriebenen Effekt.

▷ Die Teilnehmer nutzten das Skizziermedium in der 3D-Bedingung ca. 50% länger als in der 2D-Bedingung.

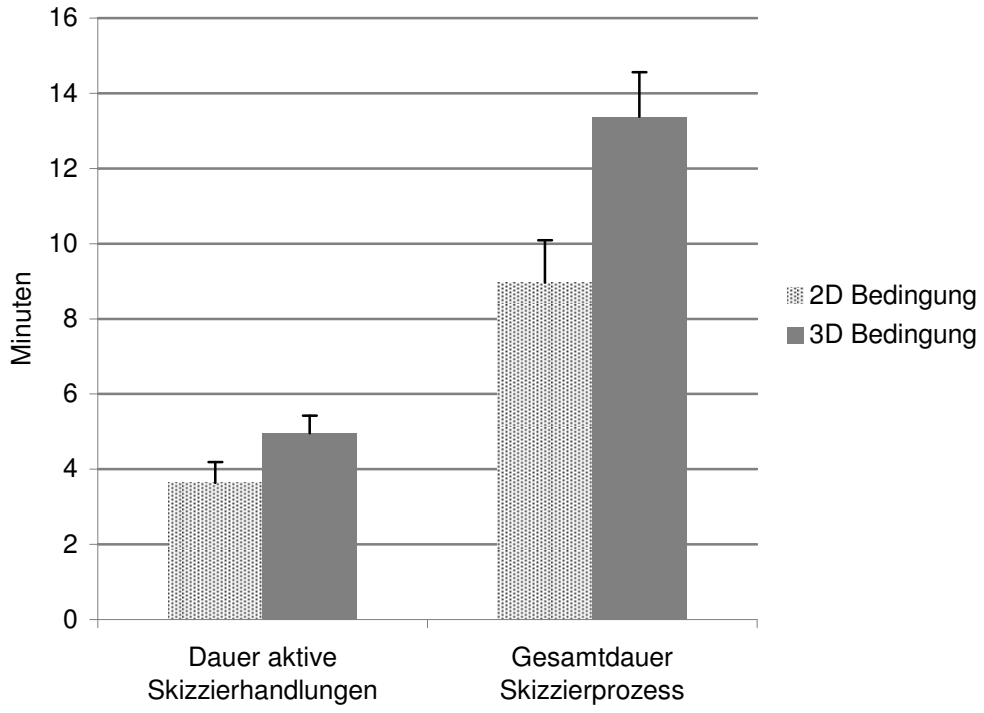


Abbildung 56: Dauer der aktiven Skizzierhandlungen und Gesamtdauer des Skizzierprozesses.

Verhältnis Gesamtdauer/aktive Skizzierdauer: Der nachträglich ermittelte Quotient aus Gesamtdauer und Skizzierdauer war in der 3D-Bedingung leicht höher als in der 2D-Bedingung (M_{3D}=2,81, SD_{3D}=0,74; M_{2D}=2,63, SD_{2D}=0,90; vgl. Abbildung 57). Nach der Auswertung lässt sich dieser Effekt jedoch nicht auf den Faktor Freiheitsgrad (F_{DOF}(1, 21,608)=1,399, p_{DOF}=0,250, η^2_{DOF}=0,0514) sondern auf den Faktor Aufgabe zurückführen (F_{AUF}(1, 21,608)=4,650, p_{AUF}=0,042, η^2_{AUF}=0,1461). Eine Interaktion zwischen beiden Faktoren wurde tendenziell signifikant ($F_{DOFxAUF}$(1, 22,333)=4,162, $p_{DOFxAUF}$=0,053, $\eta^2_{DOFxAUF}$=0,1571). Der Einfluss des Zufallsfaktors wurde nicht signifikant (*Wald Z*=1,547, p=0,122).

▷ Die Verhältnisse aus Gesamtdauer und Skizzierdauer (Reflektionszeit und Externalisierungszeit) unterscheiden sich zwischen beiden Bedingungen nicht.

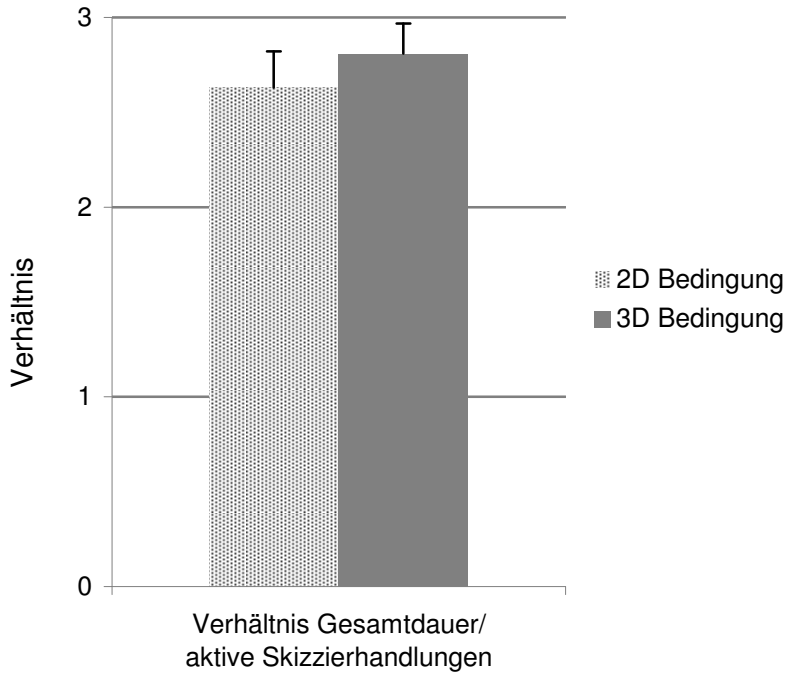


Abbildung 57: Verhältnis Gesamtdauer/aktive Skizzierdauer.

Geschwindigkeit der Benutzerbewegungen: Die Geschwindigkeit, mit der sich die Teilnehmer in der CAVE bewegten, war in der 3D-Bedingung 33 Prozent höher als in der 2D-Bedingung (M_{3D}=0,061 m/s, SD_{3D}=0,019; M_{2D}=0,046 m/s, SD_{2D}=0,031; vgl. Abbildung 58). Die Auswertung des GLM ergab, dass diese Effekte auf den Faktor der räumlichen Freiheitsgrade zurückgeführt werden können (F_{DOF}(1, 21,40)=5,11, p_{DOF}=0,034, η^2_{DOF}=0,1844) und kein signifikanter Einfluss der Aufgabe sowie keine Interaktion zwischen Aufgabe und Bedingung zu verzeichnen

war (F_{AUF}(1, 21,40)=0,311, p_{AUF}=0,583, η^2_{AUF}=0,0110; $F_{DOFxAUF}$(1, 21,85)=1,193, $p_{DOFxAUF}$>0,287, $\eta^2_{DOFxAUF}$=0,0518). Der Einfluss des Zufallsfaktors wurde ebenfalls nicht signifikant (*Wald Z*=0,932, *p*=0,352).

▷ Die Teilnehmer bewegten sich in der 3D-Bedingung 33 Prozent schneller als in der 2D-Bedingung.

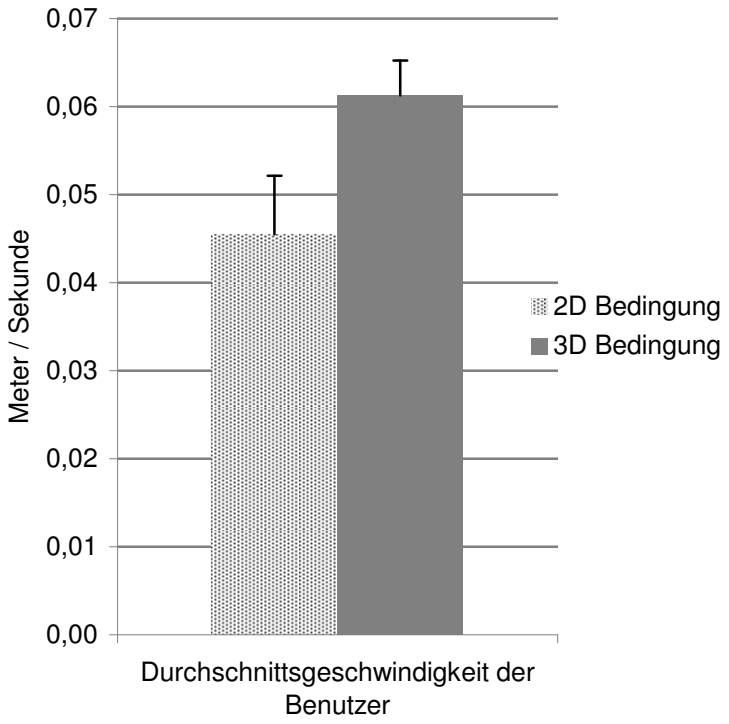


Abbildung 58: Geschwindigkeit der Benutzerbewegungen während der Skizzieraufgaben.

7.8.2 Einschätzung des Skizzierprozesses durch die Benutzer

Die Auswertung der Fragebögen zum Skizzierprozess erfolgte aufgrund deren ordinalen Datenniveaus auf Basis des Wilcoxon-Signed-Ranks-Tests (Anhang 12.6.1, S. 291).

Die Schlüsselfunktionen des Skizzierens *„Externalisieren"* ($Median_{3D}$=3, IQR_{3D}=2,25–4,00; $Median_{2D}$=2, IQR_{2D}=1,25–3,00; *Z*=-2,573, *p*<0,01) und *„Reflektieren"* („Selbstkommunikation", $Median_{3D}$=3,67, IQR_{3D}=2,33–4,00; $Median_{2D}$=2,50, IQR_{2D}=2,00–3,00; *Z*=-2,562, *p*<0,01) wurden beide in der 3D-Bedingung stärker als in der 2D-Bedingung eingestuft.

Die Teilnehmer gaben außerdem an, dass sie Ideen in der 3D-Bedingung *schneller* als in der 2D-Bedingung externalisieren konnten ($Median_{3D}$=3,00, IQR_{3D}=2,25–4,00; $Median_{2D}$=2,00, IQR_{2D}=1,00–3,00; *Z*=-2,790, *p*<0,005).

- ▷ Die Teilnehmer schätzten ihre Möglichkeiten zur Externalisierung und Reflektion in der 3D-Bedingung höher ein als in der 2D-Bedingung.
- ▷ Weiterhin gaben sie an, Ideen in der 3D-Bedingung schneller externalisieren zu können.

Ein Item[1] des Fragebogen zur *Flüssigkeit* des Skizzierprozesses verfehlte das Signifikanzniveau knapp, auch hier wurden in der 3D-Bedingung höhere Werte erreicht als in der 2D-Bedingung ($Median_{3D}$=2,50, IQR_{3D}=2,00–4,00; $Median_{2D}$=2,00, IQR_{2D}=2,00–3,00; Z=-1,615, p<0,106).

Bei allen weiteren Items, die sich auf die von Buxton abgeleiteten Kriterien des Skizzierens bezogen (vgl. Tabelle 1, Abschnitt 2.1.2, S. 17), konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Bedingungen ermittelt werden.

Die Auswertung des Items bezüglich der physischen Beanspruchung durch die Skizziertechnik ermittelte keine Unterschiede zwischen den Bedingungen. Für beide Bedingungen wurde angegeben, dass die physische Beanspruchung nur gering war ($Median_{2D}$=$Median_{3D}$=2,0).

7.8.3 Einschätzung der pragmatischen und hedonistischen Qualitäten durch die Benutzer

Die Auswertung der Ergebnisse des AttrakDiff-Fragebogens erfolgte aufgrund dessen metrischen Datenniveaus wiederum mittels Gemischter Linearer Modelle (GLM).

Für die hedonistische Qualität *Identifikation* (HQ-I) wurden in der 3D-Bedingung höhere Werte als in der 2D-Bedingung ermittelt (M_{3D}=4,55, SD_{3D}=0,84; M_{2D}=3,70, SD_{2D}=1,13; vgl. Abbildung 59). Die Auswertung des GLM ergab, dass diese Effekte auf den Faktor der räumlichen Freiheitsgrade zurückgehen (F_{DOF}(1, 21,00)=9,365, p_{DOF}=0,006, η^2_{DOF}=0,3496), wohingegen weder die Aufgabe (F_{AUF}(1, 21,000)=0,006, p_{AUF}=0,941, η^2_{AUF}=0,0334) noch eine Interaktion zwischen beiden Faktoren einen signifikanten Einfluss hatten ($F_{DOFxAUF}$(1, 21,000)=0,685, $p_{DOFxAUF}$=0,417, $\eta^2_{DOFxAUF}$=0,0151). Der Einfluss des Zufallsfaktors wurde nicht signifikant (*Wald* Z=0,000, p=1,000).

Eine vergleichbare Tendenz galt auch in der hedonistischen Qualität *Stimulation* (HQ-S), wo in der 3D-Bedingung ebenfalls höhere Werte als in der 2D-Bedingung ermittelt wurden (M_{3D}=5,94, SD_{3D}=0,58; M_{2D}=5,14, SD_{2D}=1,32; vgl. Abbildung 59). Die Auswertung des GLM ergab, dass diese Effekte allein auf den Faktor der räumlichen Freiheitsgrade zurück gehen (F_{DOF}(1, 21,00)=11,465, p_{DOF}=0,003, η^2_{DOF}=0,3016). Weder die Aufgabe (F_{AUF}(1, 21,000)=1,150, p_{AUF}=0,296, η^2_{AUF}=0,0002) noch eine Interaktion zwischen beiden Faktoren hatten einen signifikanten Einfluss ($F_{DOFxAUF}$(1, 21,000)=0,321, $p_{DOFxAUF}$=0,577, $\eta^2_{DOFxAUF}$=0,0316). Der Einfluss des Zufallsfaktors wurde nicht signifikant (*Wald* Z=0,001, p=0,999).

Dasselbe Bild ergibt sich für die *Pragmatische Qualität* (PQ; M_{3D}=4,18, SD_{3D}=1,23; M_{2D}=3,58, SD_{2D}=1,16; vgl. Abbildung 59). Auch hier hatte ausschließlich der Faktor der räumlichen Frei-

[1] Als Bezeichnung für die Fragen bzw. Aufgaben eines Fragebogens hat sich der englische Begriff „Item“ (dt. Objekt, Element) etabliert (vgl. Bortz & Döring, 2006, S. 193).

heitsgrade einen signifikanten Effekt ($F_{DOF}(1, 21{,}00)=5{,}021$, $p_{DOF}=0{,}036$, $\eta^2_{DOF}=0{,}1925$). Weder die Aufgabe ($F_{AUF}(1, 21{,}000)=0{,}352$, $p_{AUF}=0{,}559$, $\eta^2_{AUF}=0{,}0133$) noch eine Interaktion der Faktoren hatten einen signifikanten Einfluss ($F_{DOFxAUF}(1, 21{,}000)=0{,}057$, $p_{DOFxAUF}=0{,}813$, $\eta^2_{DOFxAUF}=0{,}0027$). Der Einfluss des Zufallsfaktors wurde nicht signifikant (*Wald Z*=0,004, $p=0{,}997$).

Schließlich wurde auch die *Gesamtattraktivität* des Systems (ATTR) in der 3D-Bedingung höher als in der 2D-Bedingung eingeschätzt ($M_{3D}=5{,}16$, $SD_{3D}=0{,}95$; $M_{2D}=4{,}17$, $SD_{2D}=1{,}28$; vgl. Abbildung 59), wozu ausschließlich der Faktor der räumlichen Freiheitsgrade signifikant beitrug ($F_{DOF}(1, 21{,}00)=14{,}882$, $p_{DOF}=0{,}001$, $\eta^2_{DOF}=0{,}4137$). Wiederum hatten weder die Aufgabe ($F_{AUF}(1, 21{,}000)=0{,}016$, $p_{AUF}=0{,}899$, $\eta^2_{AUF}=0{,}0005$) noch eine Interaktion der Faktoren einen signifikanten Einfluss ($F_{DOFxAUF}(1, 21{,}000)=0{,}090$, $p_{DOFxAUF}=0{,}767$, $\eta^2_{DOFxAUF}=0{,}0043$). Der Einfluss des Zufallsfaktors wurde nicht signifikant (*Wald Z*=0,004, $p=0{,}997$).

▷ Die Einschätzungen der hedonistischen und pragmatischen Qualitäten des Skizziermediums waren in der 3D-Bedingung durchgängig höher als in der 2D-Bedingung.

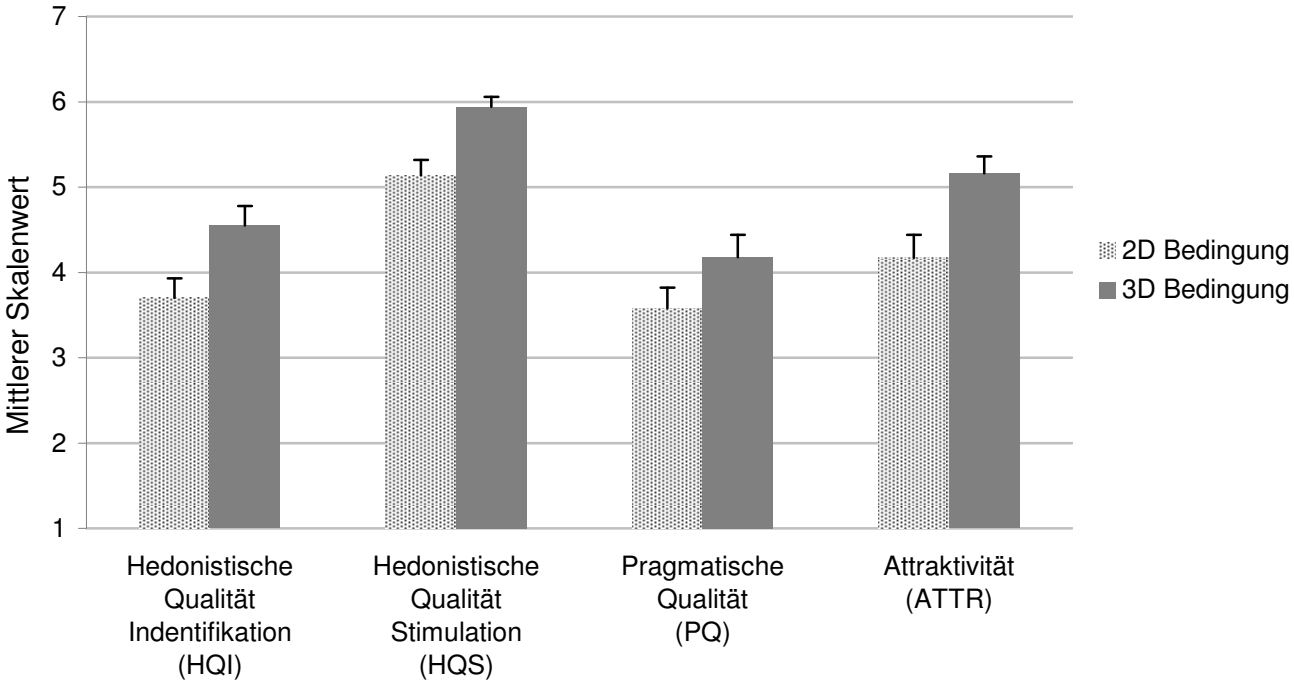


Abbildung 59: Ergebnisse des AttrakDiff-Fragebogens.

7.8.4 Qualitative Auswertung der Benutzeräußerungen

Um Aussagen der Teilnehmer über die subjektiv wahrgenommenen Vorteile und Nachteile der Versuchsbedingungen und um auch Vergleiche mit dem konventionellen Skizzieren auf Papier zu

erhalten, enthielt der Fragebogens zum Skizzierprozess offene Fragen, die inhaltsanalytisch ausgewertet wurden.

Die erste offene Frage bezog sich auf die Unterstützungsfunktion der Skizziertechnik für die Lösung der Aufgabe („Hat Ihnen die Skizziertechnik geholfen? Bitte nennen Sie die wichtigsten Gründe.“) In der zweiten offenen Frage wurden die Teilnehmer nach möglichen Problemen befragt, die während der Aufgabenlösung auftraten. („Gab es Probleme bei der Lösung der Aufgabe? Wenn ja, welche?“) Die dritte offene Frage erfragte, ob und aus welchen Gründen die Teilnehmer das zur Verfügung gestellte Papier eingesetzt hatten („Warum haben Sie Papierskizzen eingesetzt bzw. warum nicht?“).

Tabelle 10 gibt die bei der Kategorienbildung entstandenen Hauptkategorien samt beispielhaften Benutzeräußerungen wieder und nennt die Gesamtzahl der positiven und negativen Nennungen je Kategorie. Abbildung 60 zeigt die Anzahl der Benutzeräußerungen verteilt auf die sechs Kategorien. Die detaillierten Darstellungen der Subkategorien befinden sich im Anhang 12.8.6 (S. 335).

Für die statistische Überprüfung der Anzahl der Nennungen in der 2D- und 3D-Bedingung mittels des χ^2-Tests (Anhang 12.6.1, S. 291) wurden als kritische Werte $\chi^2_{(1;90\%)}$=2,70, $\chi^2_{(1;95\%)}$=3,84, $\chi^2_{(1;99\%)}$=6,63 und $\chi^2_{(1;99^9/_{00})}$=9,84 ermittelt.

Insgesamt wurden 59 negative Benutzeräußerungen in der 2D-Bedingung und 53 in der 3D-Bedingung ermittelt. Die Auszählung der positiven Benutzeräußerungen ergab 14 Äußerungen in der 2D-Bedingung und 37 in der 3D-Bedingung, dieser Unterschied wurde statistisch signifikant (χ^2=9,30; p<0,001).

- ▷ Die Teilnehmer äußerten sich häufiger positiv über die 3D-Bedingung als über die 2D-Bedingung.
- ▷ Insgesamt äußerten sich die Benutzer jedoch häufiger negativ als positiv zu beiden Bedingungen.

Signifikante Unterschiede zwischen den Häufigkeiten der Benutzeräußerungen in beiden Bedingungen sind in Tabelle 11 zusammengefasst. Darüber hinaus konnten keine statistisch signifikanten Effekte ermittelt werden.

Die Ergebnisse der qualitativen Auswertung zeigen, dass die größten Probleme der implementierten Skizziertechniken im Zusammenhang mit der *sensumotorischen Steuerung* bestehen. In diese Kategorie fielen 24 negative Äußerungen in der 2D-Bedingung und 33 negative Äußerungen in der 3D-Bedingung und keine einzige positive Äußerung. Die Teilnehmer bemängelten insbesondere die Schwierigkeit, Verbindungs- und Endpunkte der Linien zu finden und kritisierten die unzureichende Präzision der Skizzierwerkzeuge. Weiterhin wurden die eingeschränkten Möglichkeiten, gerade Linien und in verschiedenen Tiefenebenen zu zeichnen, angeführt. Auch wurden von den Teilnehmern häufig der fehlende haptische Widerstand und die räumliche Begrenzung der VR-CAVE genannt.

Tabelle 10: Aus Benutzeräußerungen abgeleitete Kategorien und deren Häufigkeiten.

Kategorie	***Beschreibung***	***Beispiel***	***Summen der Benutzeräußerungen***	
			2D-Bedingung	***3D-Bedingung***
Sensumotorische Steuerung des Skizzierprozesses	Wiederfinden von Verbindungspunkten im 3D-Raum; Reaktionszeit; Verzögerung; Occlusion; Präzision; Skizzieren von Linien; Skizzieren auf mehreren Ebenen, Skizzieren in die Tiefe etc.	„Der Abstand zwischen meiner Hand und dem virtuellen Werkzeug war störend.“	0 positive Äußerungen 37 negative Äußerungen	0 positive Äußerungen 33 negative Äußerungen
Ergonomie	Verwendung des hybriden Skizzierwerkzeugs, haptisches Feedback, Gestaltung der VR-CAVE etc.	„Ich habe den physischen Widerstand vermisst und die Kabel des Trackingsystems haben meine Hand in die falsche Richtung gezogen.“	1 positive Äußerung 6 negative Äußerungen	1 positive Äußerung 5 negative Äußerungen
Methodische Unterstützung	Ideenerzeugung, Lösungsfindung, Kommunikationswerkzeug, Analysehilfe, Assoziationsbildung etc.	„Die Skizziertechnik hat mir geholfen, meine Ideen zu bewahren.“	4 positive Äußerungen 1 negative Äußerung	5 positive Äußerungen 2 negative Äußerungen
Funktionen	Fehlende Funktionen wie Löschen, Skalieren (Zoomen), Integration in CAD-Werkzeuge	„Ich hätte gerne eine Snapping-Funktion.“	1 positive Äußerung 1 negative Äußerung	0 positive Äußerungen 2 negative Äußerungen
Vergleich zum herkömmlichen Skizzieren	Skizzieren auf Papier im Vergleich zu immersivem Skizzieren; CAD im Vergleich zu Skizzieren	„Ich hatte ein größeres Freiheitsgefühl im Vergleich zum Skizzieren auf Papier.“	1 positive Äußerung 2 negative Äußerungen	0 positive Äußerungen 1 negative Äußerung

Tabelle 10 (fortgesetzt): Aus Benutzeräußerungen abgeleitete Kategorien und deren Häufigkeiten.

Skizzierprozess	Kognitive Unterstützung (Aufmerksamkeit, Erlernbarkeit, Umgewöhnung); Physische Aspekte (körperliche Beanspruchung; Einbeziehung des Körpers; das Gefühl, direkt am Modell zu arbeiten); Reflektionsprozess (Maßstäblichkeit, Räumlichkeit, Inspiration, Umsetzungsgeschwindigkeit); Inspiration (Phantasie, Neugier, Spaß etc.)	„Die immersive Skiziertechnik erlaubte mir, durch die Skizze zu gleiten.“	7 positive Äußerungen 12 negative Äußerungen	31 positive Äußerungen 10 negative Äußerungen

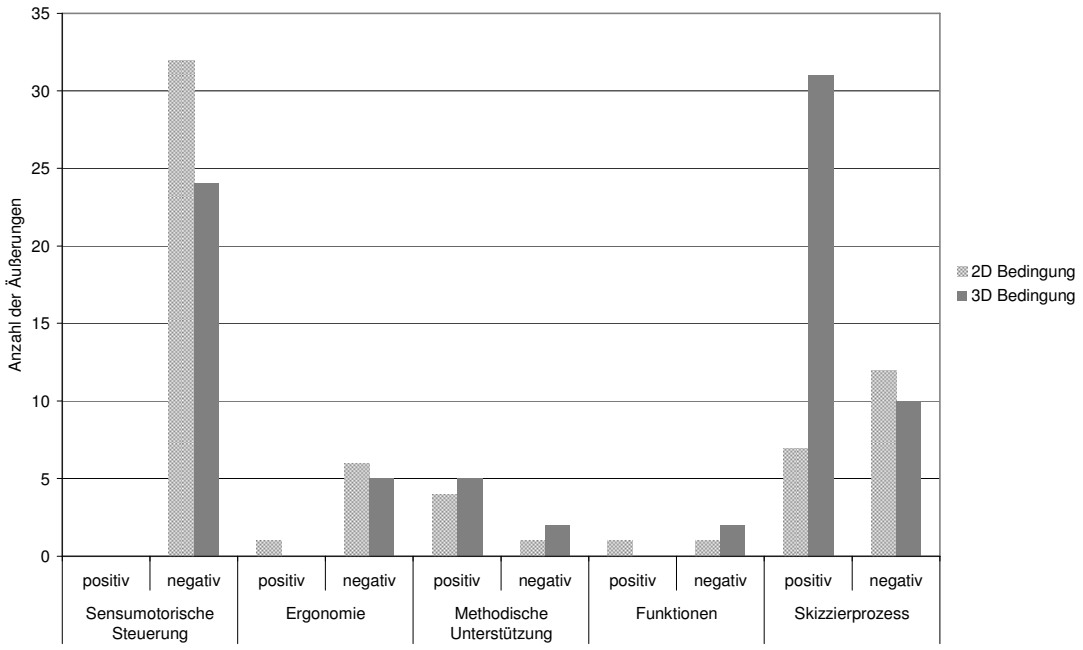


Abbildung 60: Anzahl der Benutzeräußerungen nach Kategorien.

Die *Ergonomie* der Skizzierwerkzeuge und des VR-CAVE-Systems wurde von den Benutzern in der 2D-Bedingung sechs Mal und in der 3D-Bedingung fünf Mal negativ bewertet. Am häufigsten wurde das fehlende haptische Feedback, die Handhabung des Stiftes und die zu geringe Größe der VR-CAVE genannt.

▷ Die Teilnehmer bemängelten Probleme mit der sensumotorischen Steuerung und ergonomische Probleme der Skizziertechniken.

Die *methodische Unterstützung* durch die Skizziertechniken wurde von den Teilnehmern zugunsten der 3D-Bedingung bewertet. Insgesamt wurde die 2D-Bedingung ein Mal negativ und vier Mal positiv bewertet, die 3D-Bedingung erhielt zwei negative und fünf positive Äußerungen. Es wurden die Möglichkeiten, kreative Ideen umzusetzen, mit der Skizze zu interagieren, Ideen mittels der Skizziertechniken mit Anderen zu kommunizieren, Ideen und Lösungen zu externalisieren, und parallel an mehreren Ideen zu arbeiten, positiv benannt. Kritisiert wurden die Schwierigkeiten, mittels der Skizziertechniken bestehende Ideen umzusetzen (eine Nennung in der 2D-Bedingung, zwei Nennungen in der 3D-Bedingung).

Weiterhin bestand unter den Teilnehmern der Wunsch nach kabellosen Skizzierwerkzeugen und weiteren *Funktionen* wie Löschen, Einrasten (engl. *snapping function*) und Schraffieren.

Der *Skizzierprozess* wurde von den Teilnehmern überwiegend positiv eingeschätzt. Es ergab sich ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen sieben positiven Äußerungen in der 2D-Bedingung und 31 in der 3D-Bedingung (χ^2=15,16; p<0,001, vgl. Tabelle 11). Negative Äußerungen wurden in der 2D-Bedingung zwölf und in der 3D-Bedingung zehn gezählt. Die Teilnehmer hoben insbesondere die Anregung des räumlichen Denkens, sowie die perspektivische und die maßstäbliche Eins-zu-eins-Darstellung in der 3D-Bedingung anerkennend hervor. Als nachteilig wurde die längere Einarbeitungszeit in das immersive Skizzieren genannt, welche nötig wäre, um die persönlichen Skizzierfähigkeiten auf einem Niveau auszubilden, das dem Umgang mit herkömmlichen Skizziermedien vergleichbar wäre.

▷ Die Teilnehmer äußerten sich zum Skizzierprozess in der 3D-Bedingung häufiger positiv als in der 2D-Bedingung.

Auf die Frage nach einem Gesamtvergleich zwischen *herkömmlichem Skizzieren* und den Versuchsbedingungen antwortete nur ein Teilnehmer, dass er die herkömmliche Variante bevorzuge. Dagegen gaben elf Teilnehmer an, die 3D-Bedingung zu bevorzugen. Sieben Teilnehmer schätzten die herkömmliches Skizzieren und die Versuchsbedingungen als gleichwertig ein.

Tabelle 11: Kategorien der Benutzeräußerungen mit signifikanten (*) und tendenziell signifikanten Effekten (in Klammern) zwischen den Bedingungen.

Kategorie	**Positive Äußerungen**		**Negative Äußerungen**		$\chi 2$	$p <$
	2D-Bedingung	3D-Bedingung	2D-Bedingung	3D-Bedingung		
Schwierigkeiten auf einer Ebene zu zeichnen (zur Hauptkategorie Sensumotorische Steuerung)			6	1	3,57	(0,10)
Hauptkategorie Skizzierprozess	7	31			15,16	0,001 *
Anregung des räumlichen Denkens (zur Hauptkategorie Skizzierprozess)	1	6			3	(0,10)
Innenansicht von Skizzen (zur Hauptkategorie Skizzierprozess)	0	3			3,57	(0,10)
Perspektivische Darstellung (zur Hauptkategorie Skizzierprozess)	1	6			3,57	(0,10)

7.8.5 Beobachtetes Benutzerverhalten

Die Versuchsleiter berichteten als eine typische Beobachtungen, dass viele der Teilnehmer während der 2D-Bedingung 3D-Elemente in die Skizzen integrierten, obwohl sie vor der Lösung der Aufgaben schriftlich und mündlich ausdrücklich aufgefordert wurden, dies nicht zu tun. Die meisten dieser Teilnehmer bemerkten ihren „Fehler“ und waren darüber verwundert, sie äußerten sich dazu häufig mit Aussagen wie: „Ich rutsche immer wieder ins Dreidimensionale“ oder „Ich kann nicht mehr zweidimensional denken“. Insbesondere in den Fällen, in denen die Teilnehmer zuerst in der 3D-Bedingung gearbeitet hatten, benötigten sie zusätzliche Zeit, sich auf die 2D-Bedingung zu konzentrieren. Eine visuelle Überprüfung der Skizzen ergab, dass acht der 24 Teilnehmer in der 2D-Bedingung 3D-Elemente in die Skizzen integriert hatten; davon vier Teilnehmer in Aufgabe 1 und vier in Aufgabe 2 (vgl. Abbildung 61).

▷ Ein Drittel der Teilnehmer zeichnete auch in der 2D-Bedingung 3D-Elemente.

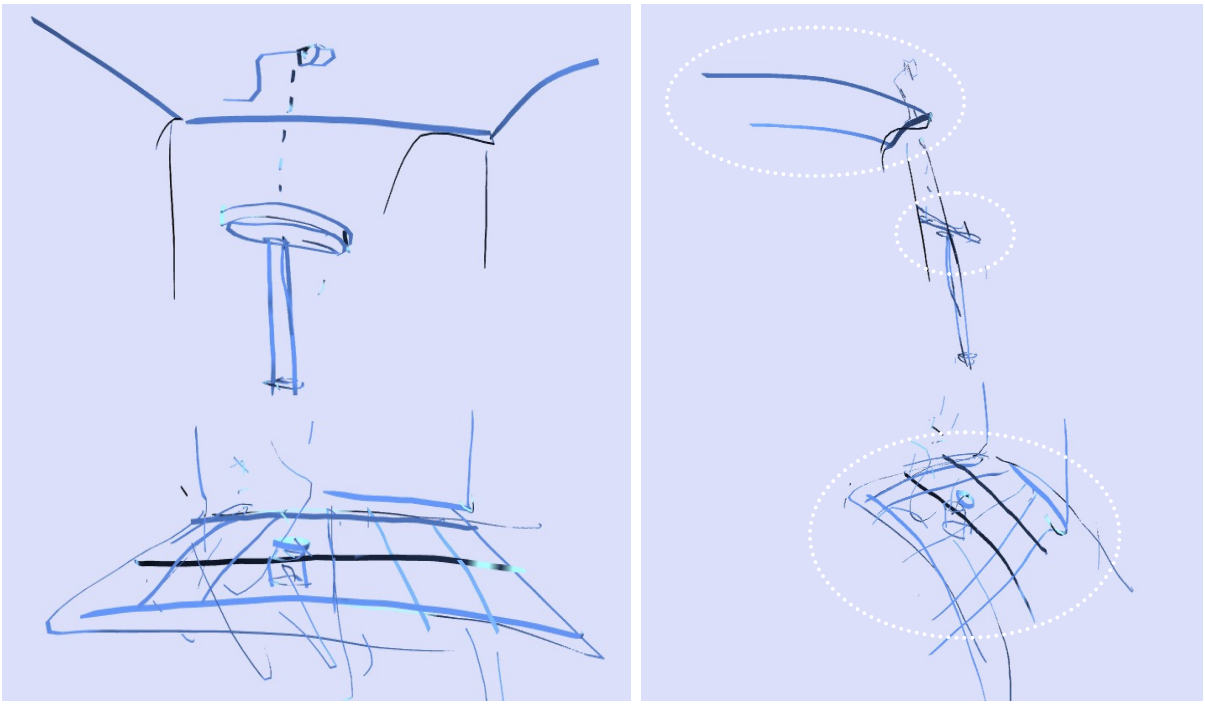


Abbildung 61: Vorder- und Seitenansicht einer Skizze (2D-Bedingung, Aufgabe 1: Hängender Tisch; dreidimensionale Elemente sind in der Seitenansicht weiß markiert).

In der 3D-Bedingung war weiterhin ein wesentlich agileres, interaktiveres Verhalten der Teilnehmer zu beobachten (in Übereinstimmung mit dem Effekt der höheren Geschwindigkeit in dieser Bedingung, Abschnitt 7.8.1, S. 157). Die Teilnehmer bewegten sich durch den Raum, nahmen verschiedene Blickwinkel auf ihre Skizzen ein (vgl. Abbildung 62) und bewegten ihre Hände und den Körper zum Teil so, als würden sie die skizzierten Objekte berühren und testen („ausprobieren“). Einige Male konnte beispielsweise beobachtet werden, dass sich Teilnehmer probeweise in von ihnen skizzierte Stühle setzten oder unter die Kanten von skizzierten Tischen blickten. Sie führten Bewegungen aus, als würden sie mit physischen Objekten interagierten und deren ergonomische bzw. interaktive Eigenschaften testen. Beispielsweise „zapfte“ ein Teilnehmer ein Bier aus der Zapfanlage einer von ihm skizzierten Bar (vgl. Abbildung 66). In der Wahrnehmung der Beobachter erschienen das Skizzieren und die Bewegung durch den Raum eng miteinander verbunden.

- ▷ Viele Teilnehmer zeigten in der 3D-Bedingung ein interaktives und agiles Verhalten.
- ▷ Einige Teilnehmer interagierten mit ihren Skizzen, setzten sich beispielsweise in skizzierte Stühle oder blickten unter Tischkanten.

Während der gesamten Versuchsdauer wurden Papier und Bleistift bereitgestellt, wovon vier Teilnehmer Gebrauch machten; darunter zwei Mal in der 2D-Bedingung, ein Mal in der 3D-Bedingung und ein Mal in beiden Bedingungen.

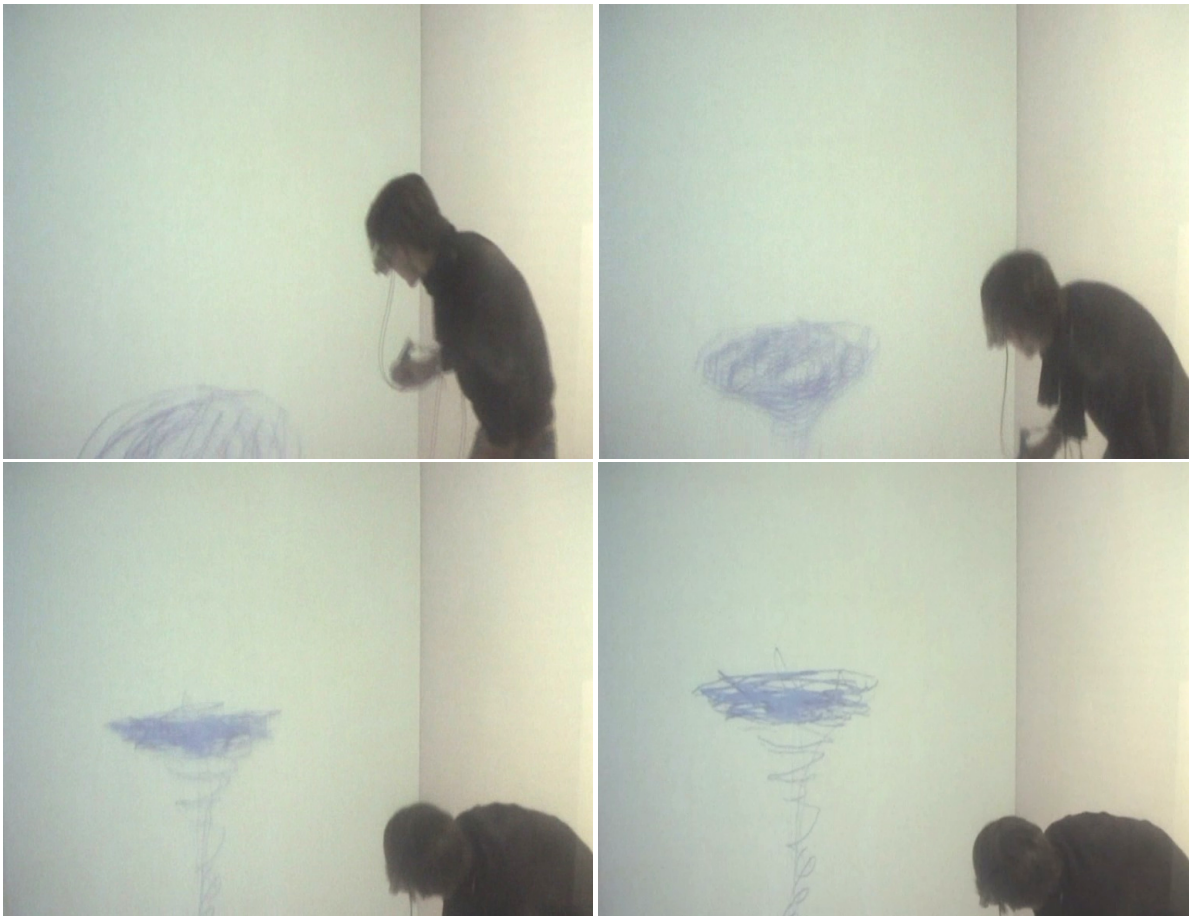


Abbildung 62: Interaktives Verhalten eines Teilnehmers (Blick unter einen skizzierten Tisch).

7.9 Ergebnisse – Skizzeneigenschaften

7.9.1 Visuelle und lösungsbezogene Eigenschaften der Skizzen

Das Aussehen der Skizzen variierte zwischen sehr ästhetischen Skizzen bis hin zu schwer verständlichen „Kritzeleien", die Kinderzeichnungen ähnelten. Die Abbildung 51 bis Abbildung 54 und Abbildung 63 bis Abbildung 66 geben einige Beispiele wieder.

▷ Das Aussehen der Skizzen variierte stark zwischen „Kinderkritzeleien" und ästhetischen Skizzen.

Perspektive: Die Auswertung der perspektivischen Skizzeneigenschaften (in Anlehnung an Urban & Jellen, 1995) ergab, dass in der 3D-Bedingung, in der drei räumliche Freiheitsgrade zur Verfügung standen, signifikant häufiger perspektivisch gezeichnet wurde als in der 2D-Bedingung mit zwei räumlichen Freiheitsgraden (M_{3D}=4,58 Punkte, SD_{3D}=2,09; M_{2D}=2,08 Punkte, SD_{2D}=2,46). Die Auswertung des GLM ergab, dass diese Effekte auf den Faktor der räumlichen Freiheitsgra-

de zurückzuführen sind ($F_{DOF}(1, 22)=21{,}429$, $p_{DOF}<0{,}001$, $\eta^2_{DOF}=0{,}3903$). Jedoch ergab sich sowohl ein tendenziell signifikanter Einfluss der Aufgabe ($F_{AUF}(1, 22)=3{,}429$, $p_{AUF}=0{,}078$, $\eta^2_{AUF}=0{,}1024$) als auch ein signifikanter Interaktionseffekt zwischen beiden Faktoren signifikant ($F_{DOFxAUF}(1, 22)=8{,}042$, $p_{DOFxAUF}=0{,}010$, $\eta^2_{DOFxAUF}=0{,}2677$). Da es sich hierbei jedoch um einen hybriden Interaktionseffekt handelt, kann der Effekt nicht hinsichtlich der Hypothesen interpretiert werden (vgl. Bortz, 2005, S. 307). Es wurde weiterhin kein signifikanter Einfluss des Zufallsfaktors festgestellt (*Wald Z*=0,901, p=0,368). Der Faktor Freiheitsgrad ist daher mit einem Anteil von 39 Prozent der Varianzaufklärung am bedeutendsten für den beschriebenen Effekt.

▷ Die Skizzen, welche in der 3D-Bedingung erstellt wurden, waren häufiger perspektivisch gezeichnet als die Skizzen der 2D-Bedingung.

Lösungsvarianten, Kreativität, Abstraktion, Ästhetik: Über die Perspektive hinaus ergab die Auswertung des TSD-Z und der Anzahl der je Aufgabe angefertigten Skizzen bzw. Lösungsvarianten mittels Gemischter Linearer Modelle keine signifikanten Unterschiede zwischen den Bedingungen (vgl. Tabelle 12). Auch die Auswertung der Expertenbewertungen mittels des Wilcoxon-Signed-Ranks-Tests (Anhang 12.6.1, S. 291, vgl.

Tabelle **13**) und die Auswertung der Abstraktionsniveaus der Skizzen nach Pache (2005) mittels des McNemar-χ^2-Tests (Anhang 12.6.1, S. 291) ergaben keine signifikante Unterschiede (vgl.

Tabelle **14**).

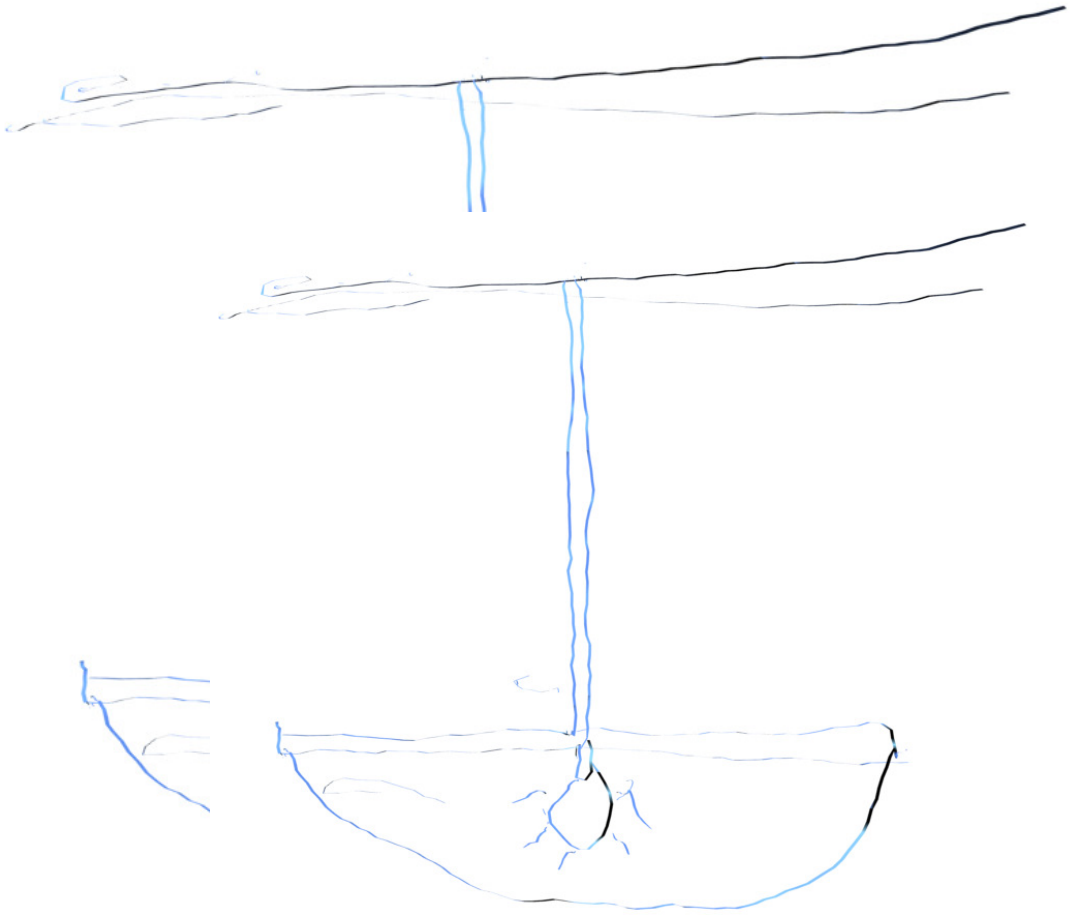


Abbildung 63: Skizze eines Hängetisches (Aufgabe 1), erstellt in der 2D-Bedingung.



Abbildung 64: Skizze eines Hängetisches (Aufgabe 1), erstellt in der 3D-Bedingung.

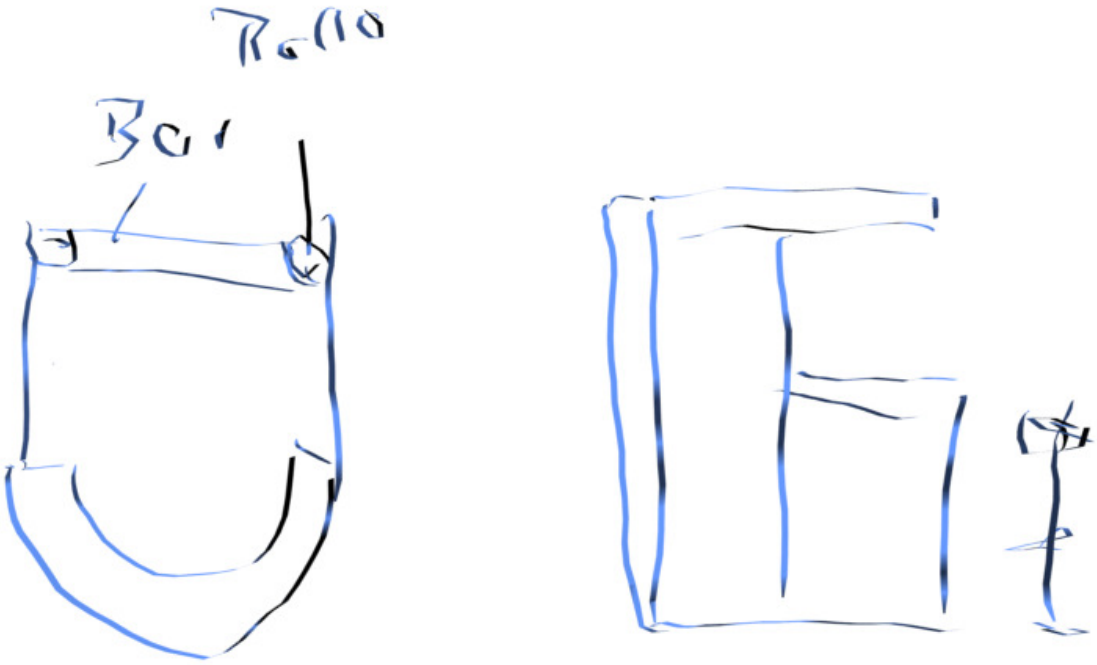


Abbildung 65: Skizze einer Bar (Aufgabe 2), erstellt in der 2D-Bedingung.

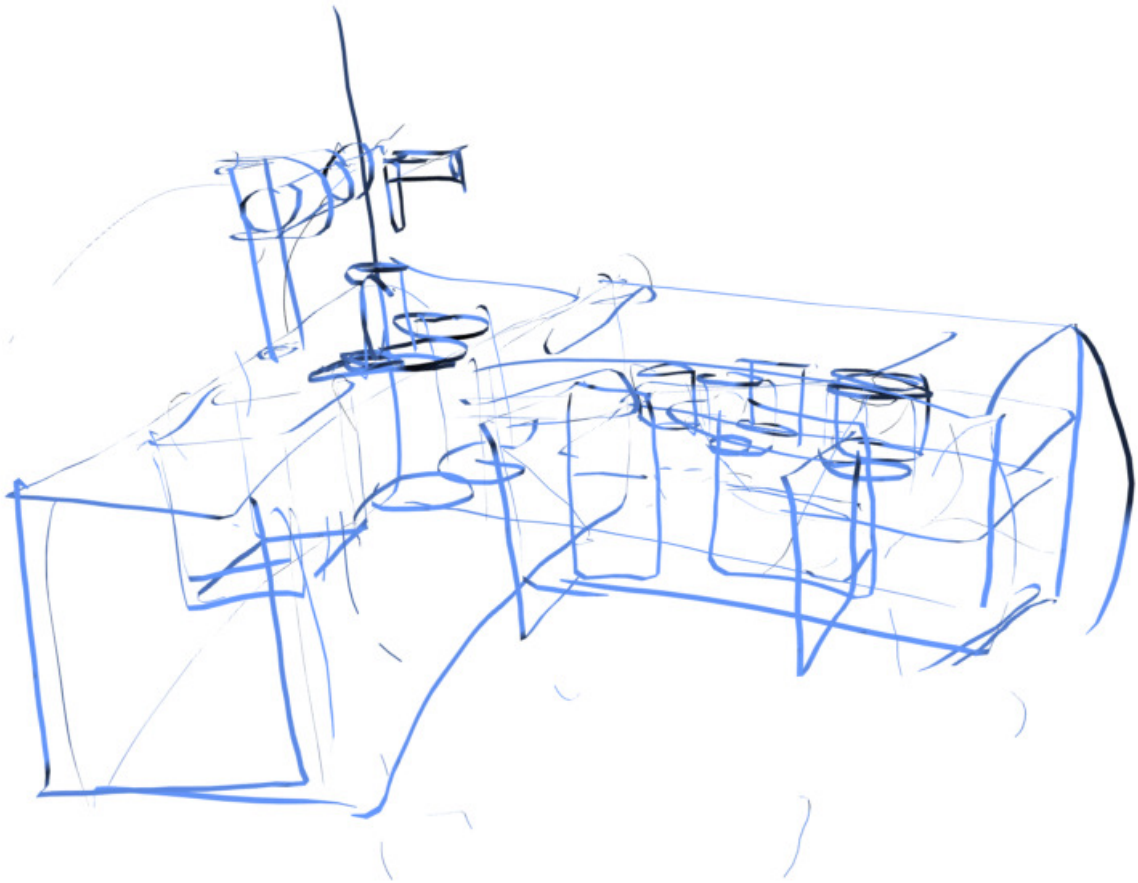


Abbildung 66: Skizze einer Bar (Aufgabe 2), erstellt in der 3D-Bedingung.

Tabelle 12: Auswertung der visuellen und lösungsbezogenen Eigenschaften der Skizzen (Auswertung mittels Gemischter Linearer Modelle).

Effekt	M_{2D}	SD_{2D}	M_{3D}	SD_{3D}	F_{DOF}(1,df)	df	p_{DOF}	η^2_{DOF}
Anzahl der je Aufgabe angefertigten Skizzen	2,67	1,579	2,375	1,209	0,602	22	0,446	0,0266
Anzahl der je Aufgabe erkennbaren Lösungs-ideen	1,458	0,779	1,542	0,8330	0,133	34,6	0,717	0,003
Test zum Schöpferischen Denken Zeichnerisch TSD-Z	11,167	4,584	12,375	4,880	0,938	22	0,343	0,040

Tabelle 13: Auswertung der visuellen und lösungsbezogenen Eigenschaften der Skizzen (Auswertung mittels Wilcoxon-Signed-Ranks-Test, N=24).

	$Median_{2D}$	IQR_{2D}	$Median_{3D}$	IQR_{3D}	Z	p
Expertenbewertung 1: Allgemeine Anforderungen	-1,00	-3,00 – 1,75	0,50	-3,00 – 1,75	-0,360	0,719
Expertenbewertung 2: Kreativer Wert des entworfenen Produkts	-1,00	-3,00 – 1,75	0,00	-2,75 – 2,00	-0,158	0,874
Expertenbewertung 3: Ästhetischer Wert der Skizze	-1,00	-3,00 – 2,00	-1,50	-4,00 – 1,00	-1,136	0,256
Expertenbewertung 4: Skizzenhaftigkeit	-1,00	-2,75 – 2,75	-1,00	-3,75 – 2,00	-0,845	0,398
Expertenbewertung 5: Mehrdeutigkeit	-1,00	-3,00 – 1,75	-0,50	-2,75 – 2,00	-0,473	0,636

Tabelle 14: Auswertung der visuellen und lösungsbezogenen Eigenschaften der Skizzen (Auswertung mittels McNemar-χ2-Tests, N=24).

Effekt	f_{2D}	f_{3D}	P
Abstraktionsstufe 1: Anzahl der Skizzen, die visuell-grafische Elemente enthalten	21	21	1,000
Abstraktionsstufe 2: Anzahl der Skizzen, die schematische Elemente enthalten	8	5	0,549
Abstraktionsstufe 3: Anzahl der Skizzen, die symbolische Elemente enthalten	5	3	0,727
Abstraktionsstufe 4: Anzahl der Skizzen, die verbale Elemente enthalten	6	3	0,375
Anzahl der Skizzen, bei denen eine Entwicklung der Lösungsidee in den zu einer Aufgabe gehörenden Skizzen erkennbar war.	10	14	0,424

7.9.2 Volumen und Fläche der Skizzen

Das Volumen der in der 3D-Bedingung erstellten Skizzen war fünffach größer als das der Skizzen der 2D-Bedingung[1] (M_{3D}=1,64 m^3, SD_{3D}=1,65 m^3; M_{2D}=0,34 m^3, SD_{2D}=0,45 m^3; vgl. Abbildung 67). Die Auswertung des GLM ergab, dass diese Effekte ausschließlich auf den Faktor der räumlichen Freiheitsgrade zurück gehen (F_{DOF}(1, 22,00)=16,984, p_{DOF}<0,001, η^2_{DOF}=0,4354), wohingegen weder die Aufgabe (F_{AUF}(1, 22,000)=0,1120, p_{AUF}=0,741, η^2_{AUF}=0,0029) noch eine Interaktion zwischen beiden Faktoren einen signifikanten Einfluss hatten ($F_{DOFxAUF}$(1, 22,000)=0,021, $p_{DOFxAUF}$=0,886, $\eta^2_{DOFxAUF}$=0,0001). Der Einfluss des Zufallsfaktors wurde nicht signifikant (*Wald Z*=1,012, p=0,312). Zwar lag für die Volumina der Skizzen keine Normalverteilung vor, das GLM ist jedoch robust gegenüber nicht normal verteilten Daten.

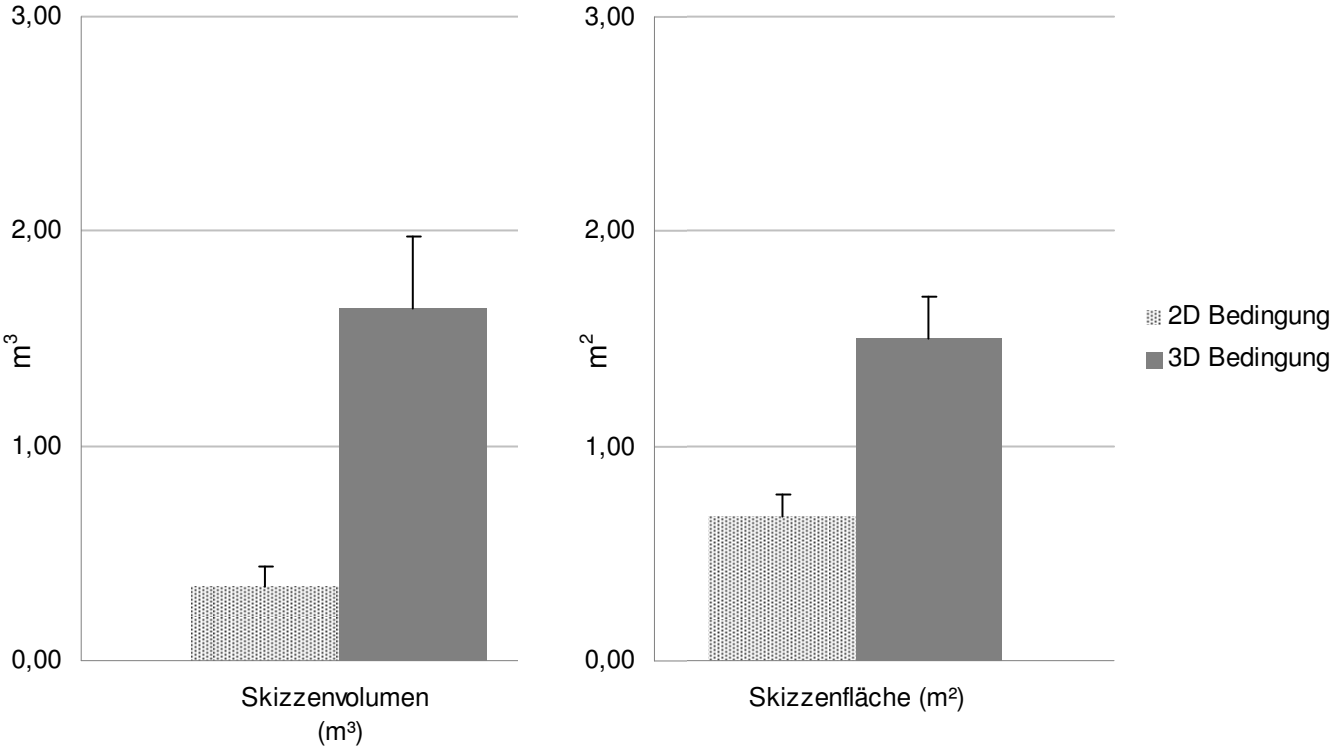


Abbildung 67: Skizzengröße und Skizzenfläche.

Ein ähnliches Bild ergab die Auswertung der jeweils von den Skizzen aufgespannten Fläche, die einen zuverlässigeren Rückschluss auf den Grad der räumlichen Ausnutzung der VR-CAVE zulässt. Die Fläche der in der 3D-Bedingung erstellten Skizzen war doppelt so groß wie die der Skizzen der 2D-Bedingung (M_{3D}=1,50 m^2, SD_{3D}=0,98 m^2; M_{2D}=0,67 m^2, SD_{2D}=0,49 m^2; vgl. Abbildung 67). Die Auswertung des GLM ergab erneut, dass diese Effekte ausschließlich auf den Faktor der räumlichen Freiheitsgrade zurück gehen (F_{DOF}(1, 22,00)=22,511, p_{DOF}<0,001,

[1] Zur Erhebung des Skizzenvolumens in der 2D-Bedingung vgl. Abschnitt 7.3.4 (S. 147).

η^2_{DOF}=0,5057), wohingegen weder die Aufgabe (F_{AUF}(1, 22,000)=0,191, p_{AUF}=0,666, η^2_{AUF}=0,0043) noch eine Interaktion zwischen beiden Faktoren einen signifikanten Einfluss hatten ($F_{DOFxAUF}$(1, 22,000)=0,003, $p_{DOFxAUF}$=0,958, $\eta^2_{DOFxAUF}$=0,0001). Der Einfluss des Zufallsfaktors wurde tendenziell signifikant (*Wald Z*=1,831, p=0,067). Insgesamt ist der Faktor Freiheitsgrad mit einem Anteil von 51 Prozent an der Varianzaufklärung am bedeutendsten für den beschriebenen Effekt.

▷ Die Skizzen, welche in der 3D-Bedingung erstellt wurden, nahmen eine größere Fläche ein, als die Skizzen der 2D-Bedingung.

7.9.3 Detaillierungsgrad der Skizzen

Der über die Anzahl der Linieneckpunkte operationalisierte Detaillierungsgrad der Skizzen erreichte in der 3D-Bedingung einen doppelt so hohen Wert wie in der 2D-Bedingung (M_{3D}=4318, SD_{3D}=2628; M_{2D}=2399, SD_{2D}=1625; vgl. Abbildung 68). Die Auswertung des GLM ergab, dass diese Effekte ausschließlich auf den Faktor der räumlichen Freiheitsgrade zurück gehen (F_{DOF}(1, 22,00)=10,892, p_{DOF}=0,003, η^2_{DOF}=0,3295), jedoch der Einfluss der Aufgabe tendenziell signifikant wurde (F_{AUF}(1, 22,000)=3,299, p_{AUF}=0,083, η^2_{AUF}=0,0907). Eine Interaktion zwischen beiden Faktoren wurde nicht ermittelt ($F_{DOFxAUF}$(1, 22,000)=0,168, $p_{DOFxAUF}$=0,685, $\eta^2_{DOFxAUF}$=0,0076). Der Einfluss des Zufallsfaktors wurde nicht signifikant (*Wald Z*=0,609, p=0,542).

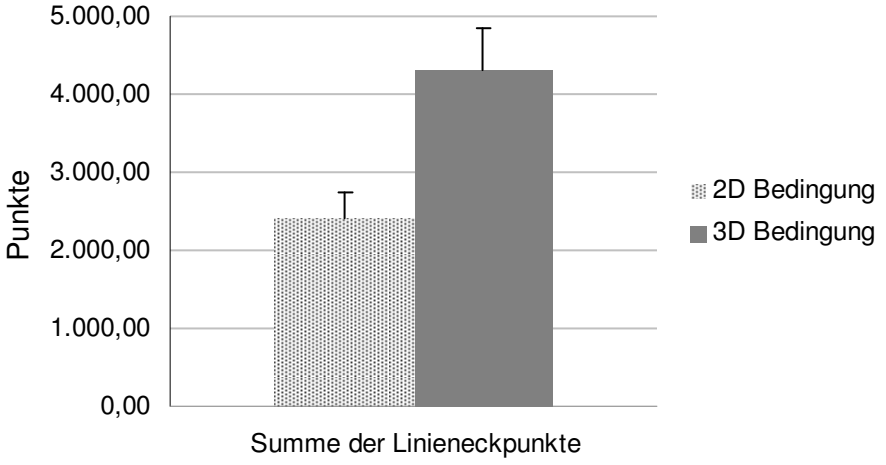


Abbildung 68: Detaillierungsgrad der Skizzen, der über die Summe der enthaltenen Linieneckpunkte operationalisiert wurde.

▷ Die Skizzen, welche in der 3D-Bedingung erstellt wurden, enthielten mehr Details als die Skizzen der 2D-Bedingung.

7.10 Diskussion

7.10.1 Die Unterstützung des Skizzierprozesses (Hypothese 1.1)

Hypothese 1.1 postulierte, dass mittels immersiven Skizzierens innere Bilder direkter und zufriedenstellender externalisiert werden können als auf zweidimensionalen Ebenen (Abschnitt 7.1, S. 144).

Die Hypothese erhält hinsichtlich der Benutzerzufriedenheit starke Unterstützung aus den Ergebnissen der Befragung. Sowohl hinsichtlich der Möglichkeiten zur Externalisierung und Reflektion als auch der Geschwindigkeit der Externalisierung präferierten die Teilnehmer die 3D-Bedingung vor der 2D-Bedingung. Ebenso wurden die hedonistischen und pragmatischen Qualitäten in der 3D-Bedingung höher eingeschätzt. Auch äußerten sich die Teilnehmer häufiger positiv über die 3D-Bedingung als über die 2D-Bedingung.

Unterstützt wird Hypothese 1.1 hinsichtlich der Direktheit der Umsetzung innerer Bilder weiterhin durch die Beobachtung, dass 3D-Elemente auch in der 2D-Bedingung verwendet wurden. Es kann auf Basis dieser Beobachtung vermutet werden, dass Möbeldesigner – bei fehlender physischer Unterlage – intuitiv dreidimensionale Objekte erstellen. „Intuitiv" beschreibt hier solche Skizziervorgänge, in denen der Gebrauch des Skizzierwerkzeugs und des Skizziermediums unterhalb der Bewusstseinsschwelle erfolgt und die Aufmerksamkeit des Anwenders auf der Entwicklung der Problemlösung liegt (vgl. Mohs et al., 2006b). Nachfolgende Studien sollten sich der Frage widmen, ob dieser Effekt auch unter anderen Aufgabenstellungen zu beobachten ist, bei denen beispielsweise zweidimensionale Objekte zu erstellen sind.

▷ Die Ergebnisse der Benutzerbefragungen und Beobachtungsergebnisse unterstützen die Hypothese, dass immersives Skizzieren mit drei räumlichen Freiheitsgraden als zufriedenstellender und direkter wahrgenommen wird als mit zwei räumlichen Freiheitsgraden.

7.10.2 Eigenschaften der Skizzen (Hypothese 1.2)

Nach Hypothese 1.2 unterscheiden sich die in der 3D- und 2D-Bedingung erstellten Skizzen in Bezug auf den kreativen Wert des skizzierten Objekts und den kreativen und ästhetischen Wert der Skizze.

In den lösungsrelevanten Faktoren *Anzahl der Lösungsvarianten, Lösungsgüte, Kreativität, Ästhetik* und *Abstraktionsstufen* können für die Hypothese 1.2 anhand der Ergebnisse keine Unterstützungsvorteile der 3D-Bedingung gegenüber der 2D-Bedingung bestätigt werden. Wenn in Betracht gezogen wird, dass die Skizzen in der 2D-Bedingung bei gleicher Bewertung schneller erstellt wurden, könnte daraus der Schluss gezogen werden, dass die 2D-Bedingung effizienteres Skizzieren ermöglicht.

Hat der dritte räumliche Freiheitsgrad demnach keinen Einfluss auf den kreativen und ästhetischen Wert des skizzierten Objekts und der Skizze? Unter der Annahme, dass die Einschätzung der 24 Teilnehmer zum Skizzierprozess auch ihre Einschätzung der während des Prozesses erstellten Skizzen umfasst, erhält man ein anderes Bild (vgl. entsprechende Argumentation bei Bailey & Konstan, 2003), denn in der Benutzereinschätzung der *Attraktivität, Pragmatik* und *hedonistischer Aspekte* erhielt die 3D-Bedingung durchgängig höhere Bewertungen

Weitere Unterstützung für die Hypothese kann aus den Ergebnissen abgeleitet werden, dass die Skizzen der 3D-Bedingungen häufiger perspektivisch gezeichnet wurden, die Skizzen der 3D-Bedingungen ein größeres Volumen einnahmen und mehr Details enthielten als in der 2D-Bedingung.

Schließlich kann eine Interpretation der Ergebnisse zuungunsten der Hypothese 1.2 auch aufgrund der Tatsache hinterfragt werden, dass die Faktoren *Lösungsgüte, Kreativität* und *Ästhetik*, in denen sich keine Unterschiede ergaben, ausschließlich über die Methode der Expertenbewertung ermittelt wurden. Es ist nicht auszuschließen, dass die verwendete Methode nicht geeignet war, evtl. vorhandene Unterschiede zu ermitteln. Zukünftige Studien sollten zur Beantwortung dieser Frage präzisere Messverfahren einsetzen.

- ▷ Die Skizzen der 3D-Bedingung waren häufiger perspektivisch und proportional gezeichnet als die Skizzen der 2D-Bedingung. Sie hatten ebenfalls ein größeres Volumen und nahmen eine größere Fläche ein als die Skizzen der 2D-Bedingung.
- ▷ Unterschiede der Lösungsgüte der Skizzen beider Bedingungen konnten anhand von Auszählungen der Lösungsvarianten und Abstraktionsstufen sowie anhand von Expertenbefragung nicht ermittelt werden. Zukünftige Studien sollten zur Ermittlung dieser Faktoren präzisere Messverfahren einsetzen.

7.10.3 Änderungen des Skizzier- und Lösungsfindungsprozesses (Hypothese 1.3)

Die Hypothese 1.3 postuliert, dass sich Skizzier- und Lösungsfindungsprozesse in Skizziermedien verschiedener Freiheitsgraden unterscheiden.

Die Benutzereinschätzungen legen den Schluss nahe, dass der Skizzierprozess hinsichtlich dessen Flüssigkeit und Externalisierungsgeschwindigkeit zugunsten der 3D-Bedingung bewertet wird. Auch die Dauer des Skizzierprozesses war in der 3D-Bedingung länger als in der 2D-Bedingung. Hieraus könnte abgeleitet werden, dass die Teilnehmer in der 3D-Bedingung eine detailliertere – und damit bessere – mentale Problemrepräsentation aufgebaut haben als in der 2D-Bedingung (vgl. Römer, 2002; Schütze, 2003).

Für eine Veränderung des Prozesses sprechen darüber hinaus das weitaus interaktivere und agilere Verhalten der Teilnehmer, sowie deren höhere Bewegungsgeschwindigkeit in der 3D-Bedingung.

Im Kontrast dazu steht jedoch, dass das Verhältnis aus Externalisierungs- und Reflektionszeit in beiden Bedingungen gleich hoch ist (M_{3D}=2,81, M_{2D}=2,63). Dies kann als Hinweis darauf inter-

pretiert werden, dass der Selbstkommunikationsprozess aus Externalisierung und Reflektion ein tiefliegender Prozess ist, der sich unabhängig vom Medium vollzieht (im Widerspruch zu Hypothese 1.3). Eine tiefere Analyse der dem 3D-Skizzierprozess zugrundeliegenden Sub-Prozesse kann hier weitere Aufschlüsse darüber liefern, welche dieser Prozesse durch die Änderung des Mediums verändert werden (vgl. Suwa et al., 1998; Just & Carpenter, 1976).

▷ Das beobachtete Benutzerverhalten war in der 3D-Bedingung wesentlich agiler und interaktiver als in der 2D-Bedingung. Das zeitliche Verhältnis aus Externalisierungs- und Reflektionsperioden scheint aber durch das Medium nicht berührt zu werden.

7.10.4 Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse der Studie legen den Schluss nahe, dass Designer immersive dreidimensionale Umgebungen als Medium zur Entwicklung von Lösungsvarianten „akzeptieren". Viele der Teilnehmer äußerten sich enthusiastisch über die 3D-Bedingung, beispielsweise äußerte einer der Teilnehmer „Ich skizziere seitdem ich achtzehn Jahre alt bin. Wenn ich von Anfang an so eine Technik zur Verfügung gehabt hätte, wie gut könnte ich dann heute sein!"

Obwohl die 2D-Bedingung dieser Studie nicht mit dem herkömmlichen Skizzieren auf Papier verglichen werden kann, lässt sich als ein Ergebnis festhalten, dass, wenn drei räumliche Freiheitsgrade für das Skizzieren zur Verfügung stehen, diese von Designern genutzt werden und ein Verzicht auf den dritten Freiheitsgrad negativ beurteilt wird. Diese Aussage wird auch durch die Ergebnisse der Inhaltsanalyse der Benutzeräußerungen und des AttrakDiff-Fragebogens unterstützt. Die Designer identifizierten sich nicht nur mehr mit der 3D-Bedingung, sie fühlten sich auch stärker stimuliert, wodurch sich eine höhere Motivation der Teilnehmer in dieser 3D-Bedingung ergeben haben sollte. Diese wiederum ist ein wesentlicher Unterstützungsfaktor kreativer Prozesse (Abschnitt 3.2.3, S. 51). Auch die pragmatische, lösungsbezogene Qualität wurde durch die Teilnehmer in der 3D-Bedingung höher eingeschätzt. Insgesamt werden dadurch die Hypothesen 1.1, 1.2 und 1.3 unterstützt.

Besonders hervorstechend ist, dass die aufgrund der Ergebnisse der Fokusgruppen erwarteten Vorteile der 3D-Bedingung, namentlich die *Räumlichkeit* (operationalisiert über die Perspektive der Skizzen), die *Eins-zu-eins-Proportionalität* (tendenziell signifikant) und die *Assoziativität* bzw. *Interaktivität,* durch die Ergebnisse der Studie bestätigt werden.

Diese Ergebnisse haben eine hohe Relevanz für die Integration des immersiven Skizzierens in digitale Produktentwicklungsprozesse, zeigen sie doch, dass mit dem immersiven Skizzieren eine aufwandsarme Methode existiert, dreidimensionale Produktmodelle zu erstellen. Diese sind für die Weiterverarbeitung in digitalen Produktentwicklungsprozessen wesentlich besser geeignet als zweidimensionale Modelle, da sie ohne Transformation direkt in CAD-Systeme importiert werden können und so einen flüssigen, iterativen Regelkreis (vgl. Stark & Krause, 2008) aus immersivem 3D-Skizzieren, 3D-CAD-Modellieren und immersiven, interaktiven Design-Reviews ermöglichen (Abschnitt 10.2, S. 240).

- ▷ Die Ergebnisse unterstreichen Vorteile der 3D-Bedingung für den Skizzierprozess, insbesondere in Hinblick auf dessen Interaktivität. Hedonistische und pragmatische Qualitäten der 3D-Bedingung lagen durchgehend höher als die der 2D-Bedingung.
- ▷ Die Skizzen, welche in der 3D-Bedingung erstellt wurden, waren häufiger perspektivisch und proportional gezeichnet als die Skizzen der 2D-Bedingung. Sie hatten ebenfalls ein größeres Volumen und nahmen eine größere Fläche ein als die Skizzen der 2D-Bedingung.
- ▷ Lösungsrelevante Vorteile hinsichtlich der Skizzeneigenschaften und -inhalte konnten mit der eingesetzten Messmethode (Expertenbefragung) jedoch nicht ermittelt werden.

Ob die Ausnutzung des dritten Freiheitsgrades tatsächlich zur Verbesserung der Entwurfslösungen bzw. Entwurfsergebnisse führt, lässt sich aus den Ergebnissen der Studie nicht mit Sicherheit beantworten. Zwar enthielten die erstellten Skizzen mehr Details und der Skizzierprozess zeigte in der 3D-Bedingung verschiedene lösungsförderliche Kennzeichen (Interaktivität, Proportionalität). Jedoch konnte in keiner lösungsrelevanten Bewertungskategorie eine Verbesserung festgestellt werden.

Die Nachbefragung der Teilnehmer ergab, dass die sensumotorische Kontrolle zu den größten Schwierigkeiten des dreidimensionalen Skizzierens gerechnet werden muss. Problematisch ist es beispielsweise, Verbindungspunkte wiederzufinden (zu „treffen“), detailliert zu skizzieren und gerade Linien und Kanten zu zeichnen. Neben einer Verbesserung der Genauigkeit des technischen Systems, sollten diese Schwierigkeiten jedoch durch angemessenes Training und Erfahrungsaufbau vermindert werden können. Diese Vermutung lässt sich durch die Beobachtung begründen, dass die visuelle Erscheinung der Skizzen jeweils anfänglich häufig Kinderzeichnungen ähnelte und am Ende deutlich klarer und ästhetischer wurde.

- ▷ Designer zeigen schon nach kurzer Zeit Verbesserungen ihrer immersiven Skizzierfertigkeiten. Diese sollten durch angemessenes Training weiter ausgebaut werden können.
- ▷ Eine Verbesserung der Genauigkeit der Trackingsysteme sollte die Gebrauchseigenschaften des immersiven Skizzierens deutlich verbessern.

Einige der Benutzermeinungen zugunsten der 3D-Bedingung könnten durch die artifiziell gestaltete 2D-Bedingung verursacht worden sein, in der der zusätzliche Aufwand auf der Ebene zu zeichnen, nicht durch einen erkennbaren Vorteil kompensiert wurde. Zukünftige Studien könnten fünf Bedingungen umfassen, namentlich:

- die 3D- und 2D-Bedingungen dieser Studie,
- eine 2D-Bedingung, in der auf einer transparenten Fläche (z. B. Plexiglas) innerhalb der VR-CAVE zu skizzieren ist,

- eine 2D-Bedingung, in der die Rückseite der VR-CAVE als Skizzierebene dient und
- eine „analoge“ 2D-Bedingung, in der auf Papierwänden in der Größe der Seitenwand der VR-CAVE skizziert würde.

Eine solche Versuchskonstruktion könnte im Detail erheben, welche der Faktoren physischer Widerstand (Unterlage), visuelle Auflösung und Kontrast, Akkomodation und Konvergenz, Verzögerung und Bildwiederholrate für die beschriebenen Ergebnisse verantwortlich sind.

7.11 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde eine vergleichende Studie des immersiven Skizzierens dokumentiert, in der die räumlichen Freiheitsgrade variiert wurden. Die Studie wurde in einer immersiven VR-CAVE durchgeführt, es nahmen daran 24 Möbeldesigner teil, welche je zwei Aufgaben zu lösen hatten. Zur Auswertung gelangten sowohl skizzen- und ergebnis- als auch prozessbezogene Variablen. Während die Auswertung der Benutzereinschätzungen zu hedonistischen und pragmatischen Qualitäten der Skizziertechniken sowie einige nicht lösungsbezogenen Skizzeneigenschaften signifikante Vorteile der 3D-Bedingung ergaben, konnten in einer Expertenbefragung keine Unterschiede in lösungsbezogenen Skizzeneigenschaften zwischen den Bedingungen ermittelt werden.

Einige der aufgrund der Ergebnisse der Fokusgruppe (Kapitel 5) erwarteten Effekte konnten durch die Studie bestätigt werden, hier insbesondere die Eins-zu-eins-Proportionalität, die interaktiven Möglichkeiten des immersiven Mediums und dessen stimulierende Effekte.

- ▷ Die Ergebnisse der Studie bestätigen die wesentlichen Erwartungen an das immersive Skizzieren, die u. a. in der Fokusgruppe gewonnen wurden.
- ▷ Immersives Skizzieren weist Alleinstellungsmerkmale auf, die ein wichtiges und neuartiges Unterstützungspotenzial für kreative Entwurfstätigkeiten erschließen.
- ▷ Immersives Skizzieren erfordert erhöhten sensumotorischen Koordinationsaufwand und Lernaufwand vom Anwender.
- ▷ Trennscharfe Verfahren zur Bewertung des lösungsbezogenen Wertes dreidimensionaler Skizzen müssen entwickelt werden.

Aus der Literatur (vgl. u. a. Diehl et al., 2004; Müller, 2007) als auch aus den Ergebnissen der Fokusgruppe und ebenso dieser Studie sind die Limitierungen des rein linienbasierten Skizzieransatzes bekannt. Die Entwicklung und Integration von Werkzeugen zur Erstellung und Manipulation von Flächen und Körpern in immersive Skizziersysteme (Anhang 12.1, S. 274) sowie die Untersuchung des Zusammenwirkens verschiedener Skizzierwerkzeuge sollten Gegenstand weiterer Untersuchungen sein. Auch wird ersichtlich, dass eine intelligente Unterstützung des Skizzierprozesses vielversprechend ist, beispielsweise indem freihändig immersiv skizzierte Objekte

automatisiert in geschlossene Oberflächenmodelle überführt würden (vgl. u. a. Igarashi et al., 1999; vgl. u. a. Diehl et al., 2004). Hierbei ist es jedoch wesentlich, dass die neu entwickelten Skizzierwerkzeuge den skizzenhaften Charakter der Modelle bewahren (beispielsweise offene, ungerade Linien erzeugen), um die assoziative Kraft und Mehrdeutigkeit der Skizzen zu erhalten.

Zukünftige Studien sollten in industriellen Umgebungen angesiedelt werden und die technische und organisatorische Integration des immersiven Skizzierens in den virtuellen Produktentstehungsprozess berücksichtigen.

Um die Gebrauchstauglichkeit zu erhöhen ist es weiterhin notwendig, die durch Trackingsysteme verursachten Verzögerungen, beispielsweise durch den Einsatz prädiktiver Filter, zu verringern (vgl. u. a. Rasmussen et al., 2006). Um den Anwendern das Zeichnen glatter Linien zu ermöglichen müssen außerdem die Ausgaben der Positionstrackingsysteme geglättet werden (Anhang 12.5.4, S. 289).

Nachdem in diesem Kapitel die Eigenschaften des immersiven virtuellen Raumes für kreative Selbstkommunikationsprozesse untersucht wurden, werden in den späteren Studien die Fragen der Werkzeuggestaltung untersucht.

8
Studie 3: Untersuchung des Einflusses hybrider Werkzeuge auf die Benutzerleistung bei der Lösung von Canonical-Manipulation-Tasks

While digital and physical media might be informationally equivalent, they are not interactionally equivalent
Paul Dourish (2001, S. 44)

Nachdem in den Studien 1 und 2 Unterstützungsfunktionen des immersiven dreidimensionalen Raumes ermittelt werden konnten, soll durch die folgenden Studien die grundsätzliche Gestaltung von Interaktionswerkzeugen zur Lösung verschiedener Aufgaben untersucht werden. Dabei werden die Platzierung der Schnittstelle zwischen Virtualität und Realität variiert und Objekte untersucht, die vollständig virtuell bzw. vollständig physisch oder hybrid virtuell/physisch repräsentiert sind.

Zunächst werden im Sinne der für die Untersuchung von VR-Interaktionstechniken üblichen Aufgabendekomposition basale Interaktionstechniken (canonical manipulation tasks, Abschnitt 4.3.3, S. 75ff) des Positionierens und Rotierens untersucht, bevor die Ergebnisse in der folgenden Studie auf komplexe Skizzieraufgaben übertragen werden (Kapitel 9).

Das Ziel dieser Studien ist die Ermittlung einer optimalen Funktionsallokation zwischen virtuellen und physischen Anteilen von VR-Interaktionswerkzeugen, um Störungen und Rauschen in kreativen Selbstkommunikationsprozessen zu reduzieren und diese optimal zu unterstützen.

8.1 Motivation

Im Rahmen dieser Arbeit wird als eine Methode, das Interaktionsproblem in VR-Anwendungen zu minimieren, eine systematische Funktionsallokation zwischen virtuellen und physischen Anteilen der Interaktionsschnittstelle diskutiert, welche sich mittels virtueller, physischer und hybrider physisch/virtueller Interaktionsobjekte realisieren lassen (Abschnitt 4.5.3. S. 98). Hybride Objekte, die aus nahtlos verbundenen physischen und virtuellen Anteilen bestehen, könnten demnach die Vorteile virtueller und physischer Objekte auf ideale Weise kombinieren.

Um generalisierbare Aussagen über die Gebrauchstauglichkeit hybrider Objekte zu ermitteln, wurden in dieser Studie basale Manipulationsaufgaben (engl. *canonical manipulation tasks, CMT*) „Positionierung" und „Rotation" untersucht, welche aus der Perspektive der Aufgabendekomposition häufig als Indikatoren für die Performanz in komplexen Interaktionsszenarien herangezogen werden (vgl. Bowman et al., 2005). Die basale Interaktionsaufgabe „Selektion" wurde aufgrund geringer Vergleichbarkeit zwischen dem Greifen virtueller und physischer Objekte zunächst nicht untersucht, sollte aber Gegenstand zukünftiger Studien sein. (Siehe auch Kritik an Selektions-basierter Time-multiplexed Interaktion in Abschnitt 4.3.5.1, S. 79).

8.2 Vorarbeiten

Der hinsichtlich der Interaktionseigenschaften zum Teil komplementäre Charakter physischer und virtueller Objekte hat bereits eine Reihe von Arbeiten inspiriert und ist in verschiedenen Ausprägungen weiterentwickelt worden, hierzu zählen Konzepte des Ubiquitous Computing, Tangible Interaction, Augmented Reality, Mixed Reality u. a. Der am weitesten reichende Ansatz wurde von Milgram und Kishino (1994) entwickelt, welche die realen und virtuellen Anteile einer Schnittstelle in einem Kontinuum zusammenfassen (Die durch die Integration virtueller und physischer Umgebungen entstehenden Wahrnehmungs- und Interaktionsprobleme wurden im Abschnitt 4.4.1, S. 85 diskutiert).

Lok et al. (2004; 2004) schlagen hybride Umgebungen (engl. *hybrid environments, HE*) vor, um „natürliche" und effiziente Interaktionen zu ermöglichen (Abschnitt 4.4.4, S. 88). In ihrem Konzept werden Videobilder physischer Objekte mit computergenerierten Hüllen überlagert und in virtuelle Szenen integriert. Indem der Benutzer das physische Objekt manipuliert, wird gleichzeitig auch dessen virtueller Anteil manipuliert. Mehrere Fallstudien konnten zeigen, dass diese Form der Interaktion, verglichen mit zeige- und kommandobasierter Interaktion, die Lernphasen verkürzt, die Wiedererkennung von Objekten erhöht, vertrauter ist und physische Begrenzungen (engl. *constraints*) bereitstellt, um Benutzerbewegungen zu führen, beispielsweise für das Eindrehen einer Schraube oder das Verschließen eines Bohrlochs.

Zhai et al. (1996) verglichen die Benutzerleistung bei der Lösung einer Andock-Aufgabe (engl. *docking task*) mittels eines 6-DOF Datenhandschuhs, der lediglich die großen Muskelgruppen des Armes und der Schulter übertrug, und eines sogenannten 6-DOF FingerBalls, der von mehreren Fingern gehalten wurde und auch die Anwendung feiner Muskelgruppen der Fingergelenkte erlaubte (Abschnitt 4.1.2, S. 64). Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen, dass die Aufgabe mit Hilfe des FingerBalls signifikant schneller gelöst werden kann. Daraus lässt sich die Vermutung

ableiten, dass hybride Objekte gegenüber konventionellen, Datenhandschuh-basierten Interaktionstechniken vorteilhafter sind, wenn die Lösung der Aufgaben eine präzise motorische Steuerung erfordert. Hybride Objekte können wie physische Objekte präzise mit den Fingern manipuliert werden (Präzisionsgriff, Abschnitt 4.1.2, S. 64), virtuelle Objekte, die mittels Datenhandschuhen gesteuert werden, erlauben dies aufgrund von Ungenauigkeit und Kalibrierungsproblemen jedoch nicht.

Kitamura et al. (2002) untersuchten die Anwendung physikalischer Gesetze in hybriden Umgebungen, insbesondere magnetischer Kräfte. Sie konnten zeigen, dass die Benutzerperformance dann am höchsten war, wenn virtuelle und reale Objekte auf die gleiche Weise reagierten.

Ware und Ross (1999) verglichen die Benutzerperformance bei der Rotation physischer Objekte mit realem und virtuellem visuellem Feedback. In einer ersten Studie wurden alle Objekte mittels physischer Objekte (Griffe) derselben Form und Größe manipuliert. Die virtuelle Bedingung dieser Studie wurde so realisiert, dass virtuelle Objekte mittels eines Spiegels an die Position der Hände und der Griffe projiziert wurden, wobei die Sicht auf diese durch den Spiegel blockiert wurde. In der physischen Bedingung konnte dagegen direkt auf den physischen Griff geblickt werden. In dieser Studie ergab sich ein signifikanter Unterschied in der Rotationsdauer. Diese dauerte in der virtuellen Bedingung durchschnittlich 450 ms länger als die Rotation realer Objekte (M_V=2,25 s, M_P=1,80 s). Ware und Ross führen diesen Unterschied auf die Verzögerung zurück, die in der virtuellen Bedingung durch das Trackingverfahren und die Berechnung der grafischen Darstellung (engl. *rendering*) verursacht wurde (vgl. auch Ware & Balakrishan, 1994). Eine zweite Studie ergab, dass die Teilnehmer die Objekte signifikant schneller rotieren konnten, wenn der physische Griff und das virtuelle Objekt ortsgenau überlagert wurden, als wenn ein räumlicher Versatz, hier 60 cm, zwischen den Händen des Benutzers und dem Ort des visuellen Feedbacks existierte ($M_{in\text{-}situ}$=3,70 s, $M_{displaced}$=4,96 s).

Während die überwiegende Anzahl bisheriger Studien die Gebrauchstauglichkeit gänzlich physisch repräsentierter Objekte mit gänzlich virtuell repräsentierten Objekten verglich und die Überlegenheit physischer Objekte für verschiedene Aufgaben zeigen konnte (vgl. u. a. Hinckley et al., 1994a; Fitzmaurice & Buxton, 1997; Insko, 2001), war es das Forschungsinteresse dieser Studie, zu ermitteln, ob diese Erkenntnisse auch für hybride virtuell/physische Objekte gelten. Hierzu wurde deren Gebrauchstauglichkeit für basale Manipulationsaufgaben mit der Gebrauchtauglichkeit virtueller und physischer Objekte verglichen.

- ▷ Es existieren starke empirische Befunde für die Verschiedenheit der Interaktionseigenschaften physischer und virtueller Objekte.
- ▷ Die Interaktionseigenschaften hybrider physisch/virtueller Objekte wurden bisher nicht ausreichend untersucht.

8.3 Hypothesen

In der Hypothese 2 wurde postuliert, dass hybride Objekte (Tangible User Interfaces) das Rauschen in der Mensch-Maschine-Interaktion reduzieren und flüssige Interaktionen erlauben (Abschnitt 6.4, S. 139). Außerdem verbänden sie physische Manipulierbarkeit und visuelle Integration in virtuelle Umgebungen unter den bestehenden technischen Bedingungen optimal. Diese Hypothese wurde in der vorliegenden Studie anhand dreier Unterhypothesen untersucht. Dazu wurden zunächst basale Manipulationsaufgaben herangezogen (die Untersuchung kreativer Entwurfsprozesse erfolgt in der folgenden Studie 4). Die Untersuchung der Interaktionseigenschaften orientierte sich an der Definition der Gebrauchstauglichkeit (Abschnitt 6.4, S. 139) und erfolgte anhand der Lösungszeit und -güte, sowie der Benutzerzufriedenheit:

Hypothese 2.1: Hybride Objekte können effizienter, d. h. schneller manipuliert werden als physische und virtuelle Objekte.

Hypothese 2.2: Hybride Objekte können effektiver, d. h. genauer manipuliert werden als physische und virtuelle Objekte.

Hypothese 2.3: Die Interaktion mittels hybrider Objekte löst größere Benutzerzufriedenheit aus als die Interaktion mit rein physischen und virtuellen Objekten.

Neben diesen Hypothesen sollte die Studie folgende Forschungsfragen beantworten:

- Werden die physischen und virtuellen Anteile hybrider Objekte als Einheit oder als getrennte Objekte wahrgenommen?
- Gibt es eine Abhängigkeit der Benutzerperformance und -zufriedenheit von dieser subjektiv wahrgenommenen Objekteinheit?

Diese Forschungsfragen haben u. a. direkte Implikationen für die Gestaltung zukünftiger Tracking- und Displaytechnologien.

8.4 Interaktionstechniken

Diese Studie wurde in derselben technischen Umgebung wie die Studie 2 ausgerichtet, einer VR-CAVE mit fünf Rückprojektionsflächen. Als Latenzzeit wurden mittels einer Hochgeschwindigkeitskamera ca. 125 ms und als Wiederholrate der Bilderzeugung (engl. *rendering*) 84 Hz ermittelt.

Die zu manipulierenden Objekte bestanden aus einem Griff und einem Referenzobjekt, auf das sich die Aufgaben bezogen. Sie wurden in allen Bedingungen hinsichtlich ihrer Farbe und Form konstant gehalten.

- In der *physischen* Bedingung wurden der Griff (11,0 cm hoch, 6,0 cm Durchmesser) und das Referenzobjekt als physische, greifbare Objekte repräsentiert, die über einen Stab verbunden waren, der, je nach Größe des Referenzobjekts, eine Länge von 11,0 bis 12,7 cm hatte. Die Teilnehmer wurden instruiert, das Objekt ausschließlich am Griff zu halten (vgl. Abbildung 69 und Abbildung 71).
- In der *hybriden* Bedingung wurde nur der Griff als greifbares, physisches Objekt repräsentiert, der Verbindungsstab und das Referenzobjekt dagegen rein virtuell. Der Verbindungsstab

wurde vorsätzlich integriert, obwohl er zur Lösung der Aufgabe nicht notwendig war. Hierdurch sollte einerseits eine Vergleichbarkeit zwischen den Bedingungen gewährleistet werden, weiterhin wurde vermutet, dass dadurch Griff und Referenzobjekt stärker als zusammengehöriges, einheitliches Objekt wahrgenommen werden konnten (vgl. Abbildung 69 und Abbildung 70).

- In der dritten Bedingung wurden alle Bestandteile *virtuell* repräsentiert. Die Teilnehmer trugen einen Handschuh; die Position des virtuellen Griffs wurde neben die Handinnenfläche projiziert. Das gesamte Objekt bewegte und drehte sich entsprechend der Bewegungen der Hand (vgl. Abbildung 69 und Abbildung 72).

In der physischen und der hybriden Bedingung war ein magnetischer Sensor (Ascension MotionStar-Trackingsystem) innerhalb der Griffe platziert um die Position und Orientierung der Objekte zu bestimmen. In der virtuellen Bedingung war der Sensor an der Unterseite des Handschuhs angebracht.

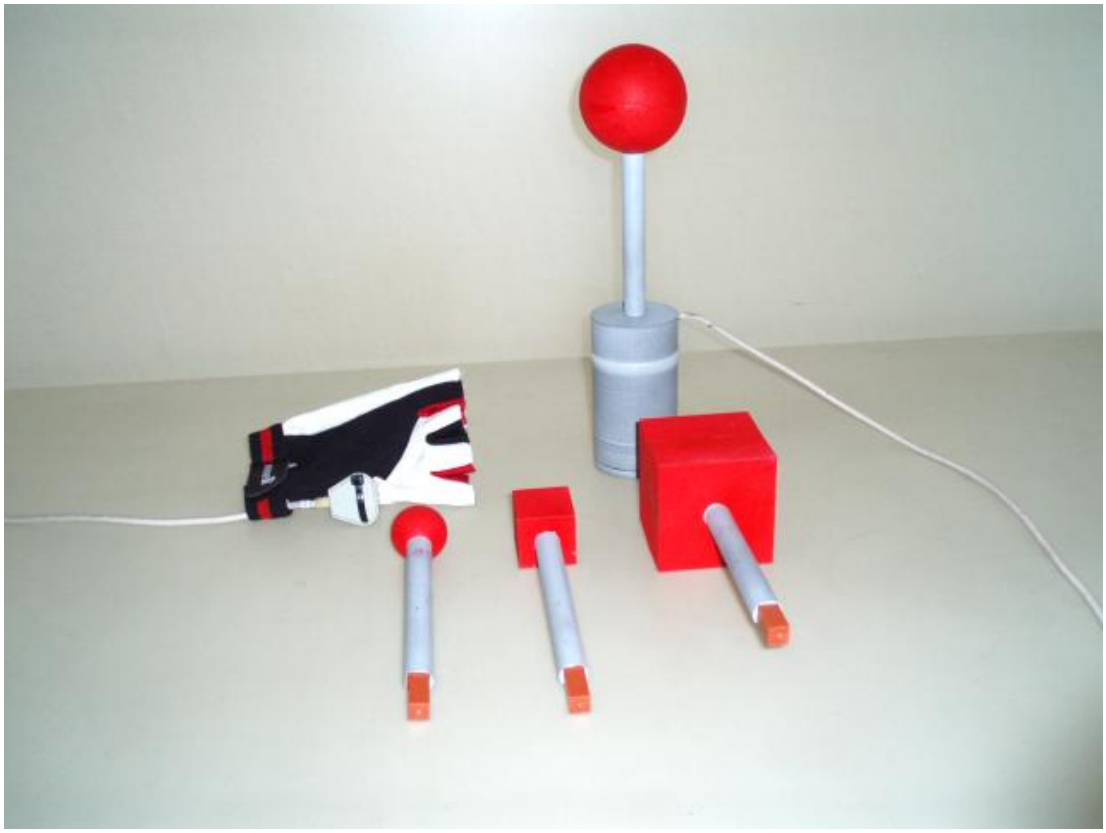


Abbildung 69: Handschuh für die virtuelle Bedingung (links), Referenzobjekte für die physische Bedingung (vorne), Griff für hybride und physische Bedingung (rechts, hier mit aufgestecktem Kugel-Referenzobjekt).

8.5 Erhebungs- und Bewertungsmethoden

Um die drei Bedingungen hinsichtlich der Benutzerzufriedenheit, der Beanspruchung durch die Interaktionstechnik sowie der wahrgenommenen Objekteinheit bewerten zu können, wurde ein Fragebogen mit zehn Fragen (Items) pro Interaktionstechnik und sieben Fragen zu den Aufgaben erstellt. Weiterhin wurde nach der Beendigung jeder Bedingung der „AttrakDiff" Fragebogen, sowie am Ende des Versuchs der 3D-Würfeltest eingesetzt (vgl. Studie 2, Abschnitt 7.3.1, S. 147).

Um mögliche Effekte aufgrund der Vorerfahrung der Teilnehmer erfassen zu können, wurde diese mit einem weiteren Fragebogen erfasst, in der die persönliche Erfahrung mit 3D-Computerspielen, Interaktionsgeräten, VR- und 3D-CAD-Software erfragt wurde (Anhang 12.9.1, S. 337). Diesen Fragebogen beantworteten die Teilnehmer zu Beginn des Versuchs.

8.6 Teilnehmer

An der Studie nahmen 36 Personen teil (18 Männer, 18 Frauen), allesamt Studierende der Technischen Universität Berlin. Alle Teilnehmer waren Rechtshänder, ihr Durchschnittsalter lag bei 26 Jahren (*SD*=2,88). Die Rekrutierung der Teilnehmer erfolgte per E-Mail und über Aushänge an der Universität. Alle Teilnehmer erhielten eine finanzielle Aufwandsentschädigung.

13 der 36 Teilnehmer gaben an, viel bis sehr viel Erfahrung mit 3D-Computerspielen (2), 3D-Interaktionsgeräten (Joysticks, 3) und CAD-Software (9) zu haben. Keiner der Teilnehmer hatte Vorerfahrung mit virtuellen Umgebungen.

8.7 Experimentelle Aufgaben

Die Teilnehmer wurden in zwei unabhängigen Experimenten mit zwei Aufgabentypen konfrontiert, im ersten Experiment mit Rotationsaufgaben, anschließend mit Positionierungsaufgaben (Anhang 12.9.1, S. 337).

8.7.1 Rotationsaufgabe

Die erste Aufgabe bestand darin, das Referenzobjekt (hier ein roter Würfel) derart rotieren zu lassen, dass es die gleiche räumliche Orientierung wie ein blaues Stimulusobjekt – ebenfalls ein Würfel in gleicher Größe wie das Referenzobjekt – hatte (vgl. Abbildung 70). Das Stimulusobjekt wurde 20 cm über dem Zentrum der CAVE projiziert und seine Orientierung über die fünf Rotationsaufgaben in allen drei räumlichen Dimensionen variiert. Die Aufgabe der Teilnehmer bestand also darin, die räumliche Orientierung des Stimulusobjekts auf das Referenzobjekt zu übertragen, indem der damit verbundene Griff entsprechend rotiert wurde. Die Position des Referenzobjekts spielte für die Auswertung keine Rolle. Eine Kollision oder direkte Überlagerung des Referenzobjekts mit dem Stimulusobjekt sollte von den Teilnehmern aber vermieden werden.

Sobald das Interaktionsobjekt für mehr als eine Sekunde weniger als 1 ° rotiert bzw. weniger als 1 cm bewegt wurde, wurde dies als Stillhalten interpretiert und die Lösungszeit und -genauigkeit aufgezeichnet. Die Lösungsgenauigkeit wurde anhand der Unterschiede der Orientierungen von Stimulus- und Referenzobjekt in der x-, y- und z-Achse bestimmt. Als Gesamtgenauigkeit wurde, abweichend von Ware und Ross (1999), pro Versuch die Summe der Abweichungen je räumli-

cher Achse und nicht der kleinste Winkel bestimmt, welcher zur Überführung beider Orientierungen ineinander zu überwinden wäre. Nach jeder Aufgabe wurde das Stimulusobjekt ausgeblendet, und die Teilnehmer mussten das Referenzobjekt auf einen gelb markierten Startpunkt bewegen, danach wurde die nächste Aufgabe gestartet.

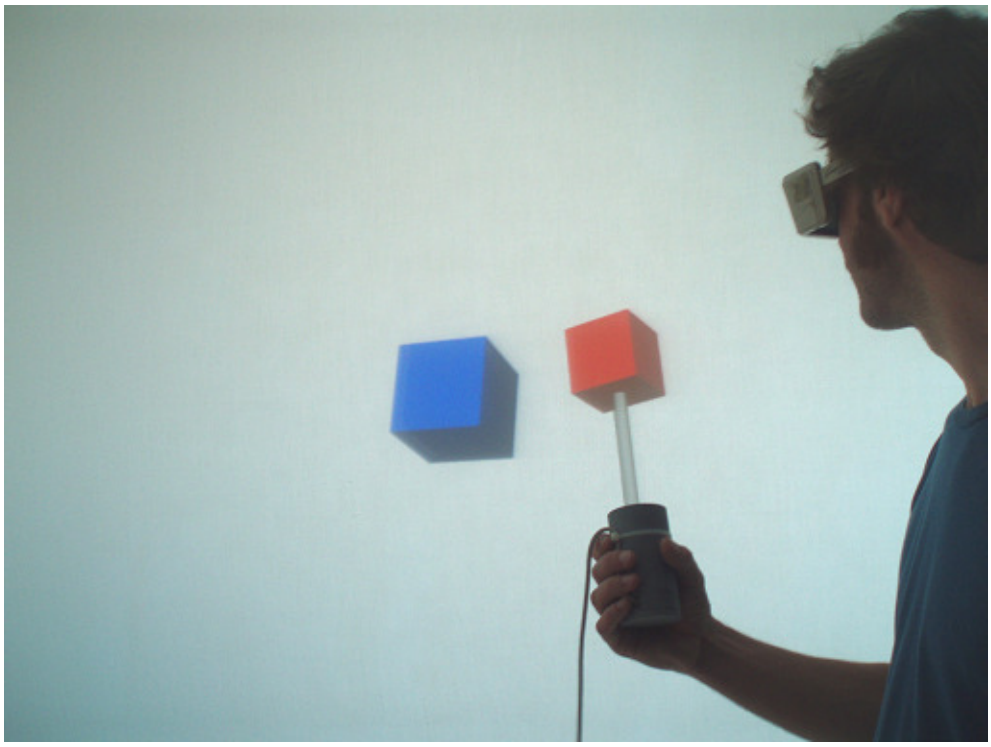


Abbildung 70: Rotationsaufgaben mittels des hybriden Objekts (Referenzobjekt rot, Stimulusobjekt blau).

Die Position des Stimulusobjekts wurde nicht verändert, da Effekte bezüglich der Positionierung in dieser Aufgabe ausgeschlossen werden sollten. Um Effekte in Abhängigkeit der Größe der Referenz- und Stimulusobjekte zu reduzieren, wurde die Größe zwischen 7,0 cm und 3,5 cm Kantenlänge variiert.

8.7.2 Positionierungsaufgabe

In der Positionierungsaufgabe wurde als Referenzobjekt eine rote Kugel verwendet, deren Position im gleichen Abstand über eine Zielfläche gehalten werden sollte, in der ein Stimulusobjekt (eine blaue Kugel) über einer blauen Fläche schwebte (vgl. Abbildung 71 und Abbildung 72). Die Aufgabe bestand demnach darin, den Abstand des Stimulusobjekts zu bestimmen und das Referenzobjekt auf eine entsprechende Position über der Zielfläche zu bewegen.

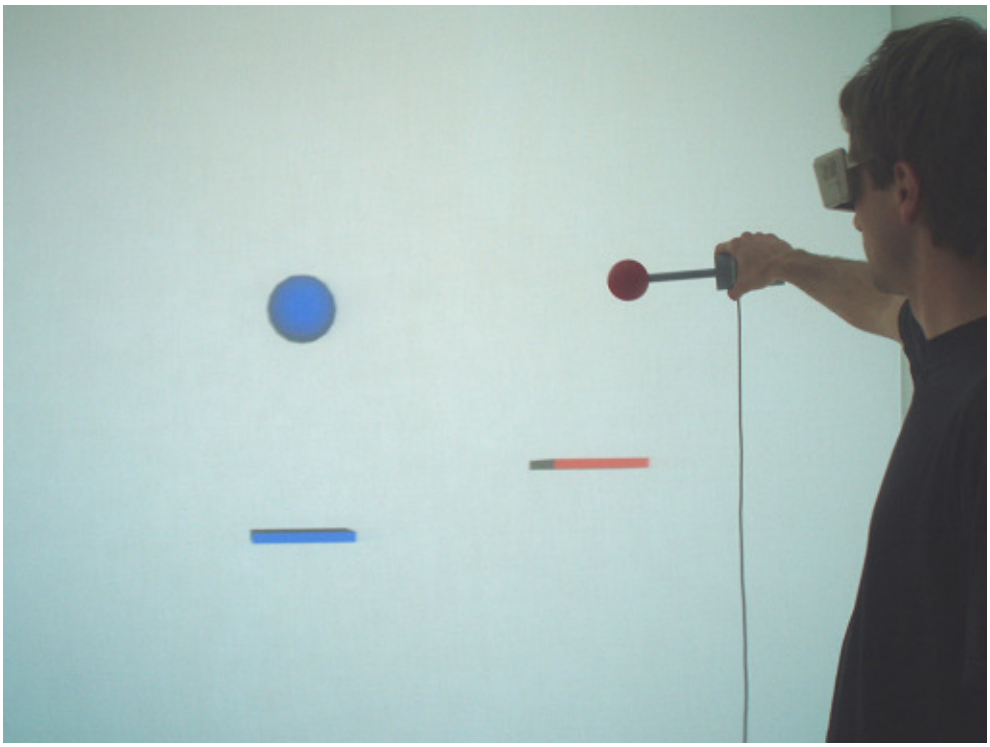


Abbildung 71: Positionierungsaufgabe mittels des physischen Objekts (Referenzobjekt rot, Stimulusobjekt blau).

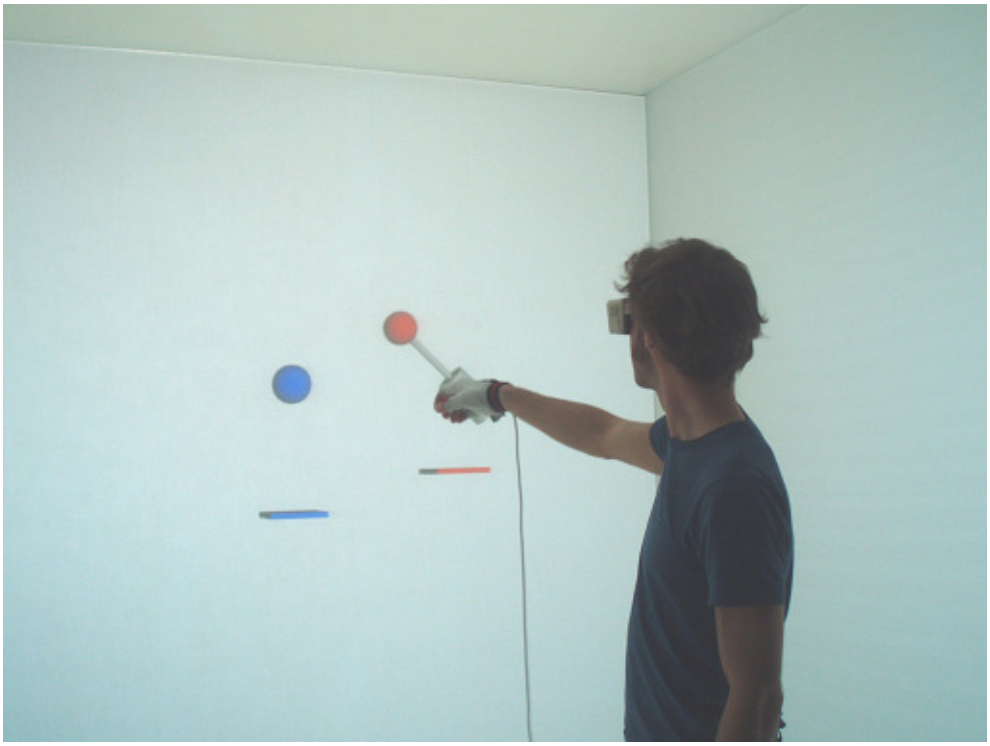


Abbildung 72: Positionierungsaufgabe mittels des virtuellen Objekts (Referenzobjekt rot, Stimulusobjekt blau).

Die Zielfläche, das Stimulusobjekt und dessen Referenzfläche wurden jeweils unterschiedlichen Positionen eines (nicht sichtbaren) 3 x 3 Feldes zugewiesen. Die Höhe der Referenz- und Zielflä-

che wurde für jede Positionierungsaufgabe unabhängig voneinander ebenfalls variiert, ebenso der Abstand des Stimulusobjekts von seiner Referenzfläche (vgl. Abbildung 73). Eine Positionierungsaufgabe wurde daher definiert durch die Position und die Höhe der Referenzfläche, die Position und die Höhe der Zielfläche und die Höhe des Stimulusobjekts über der Referenzfläche.

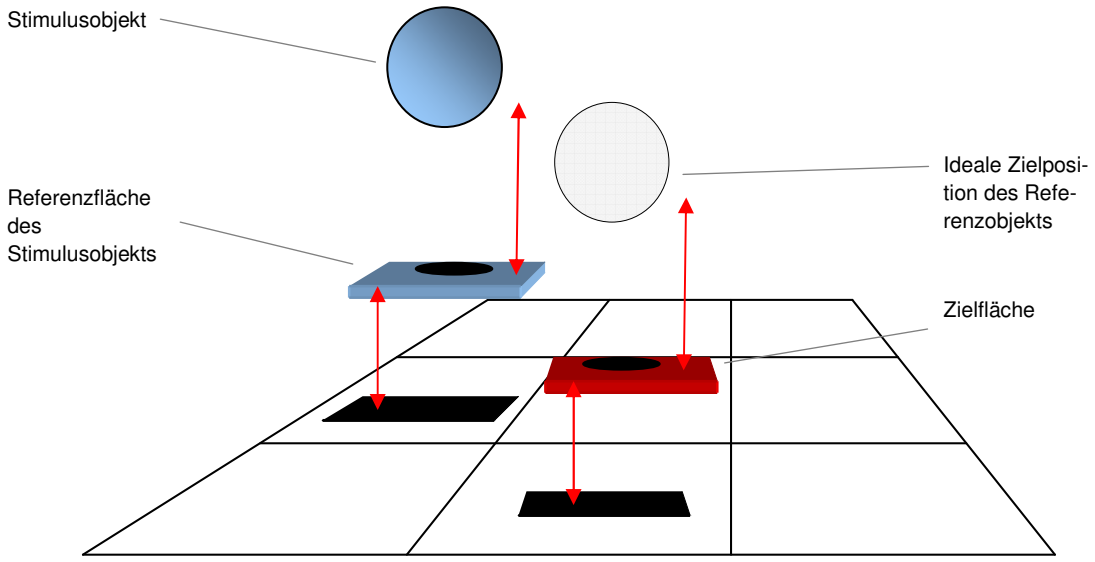


Abbildung 73: Parameter der Positionierungsaufgabe.

Auch in dieser Aufgabe mussten die Teilnehmer das Referenzobjekt zwischen den Teilaufgaben auf den gelb markierten Startpunkt im Zentrum der CAVE bewegen.

Die Erfassung der Lösungszeit war identisch zur Rotationsaufgabe. Die Genauigkeit der Ausführung der Aufgabe wurde durch die Abweichung der tatsächlichen Position des Referenzobjekts von der idealen Zielposition in Bezug auf die x-, y- und z-Achse des Koordinatensystems bestimmt. Der Gesamtfehler wurde, abweichend von Ware und Balakrishan (1994), als Summe der Abweichungen in den drei Achsen bestimmt.

8.8 Design und Ablauf des Versuchs

Das Ziel der beiden Experimente war die Untersuchung der Hypothesen 2.1, 2.2 und 2.3 jeweils anhand einer der basalen Interaktionsaufgaben Rotation und Positionierung. Alle Teilnehmer durchliefen beide Experimente in derselben Reihenfolge, zuerst die Rotationsaufgabe und anschließend die Positionierungsaufgabe.

In jedem Experiment wurden drei Aufgabenblöcke (Rotationsaufgaben 1-3, Positionierungsaufgaben 1-3) á sechs Aufgaben in einer Messwiederholung durchlaufen, die in den beschriebenen Aufgabenparametern variierten. Von diesen sechs Aufgaben floss die jeweils erste nicht in die Auswertung ein, um mögliche Umgewöhnungseffekte zwischen den Bedingungen zu reduzieren.

Die Reihenfolge der Aufgabenblöcke und -parameter blieb für alle Teilnehmer konstant, jedoch wurde die Reihenfolge der Versuchsbedingungen, d. h. die physische (P), hybride (H) und virtuelle Interaktionstechnik (V), zufällig variiert, wodurch jeweils sechs gleich große Gruppen entstanden (vgl. Tabelle 15, Tabelle 16).

Tabelle 15: Einfaktorieller Versuchsplan mit Messwiederholung des Rotationsexperiments.

	Physische Interaktionstechnik P	*Hybride Interaktionstechnik H*	*Virtuelle Interaktionstechnik V*
Rotationsaufgabe 1	Gruppe 1 (PHV), Gruppe 4 (PVH)	Gruppe 2 (HVP), Gruppe 5 (HPV)	Gruppe 3 (VPH), Gruppe 6 (VHP)
Rotationsaufgabe 2	Gruppe 3 (VPH), Gruppe 5 (HPV)	Gruppe 1 (PHV), Gruppe 6 (VHP)	Gruppe 2 (HVP), Gruppe 4 (PVH)
Rotationsaufgabe 3	Gruppe 2 (HVP), Gruppe 6 (VHP)	Gruppe 3 (VPH), Gruppe 4 (PVH)	Gruppe 1 (PHV), Gruppe 5 (HPV)

Tabelle 16: Einfaktorieller Versuchsplan mit Messwiederholung des Positionierungsexperiments.

	Physische Interaktionstechnik P	*Hybride Interaktionstechnik H*	*Virtuelle Interaktionstechnik V*
Positionierungsaufgabe 1	Gruppe 1 (PHV), Gruppe 4 (PVH)	Gruppe 2 (HVP), Gruppe 5 (HPV)	Gruppe 3 (VPH), Gruppe 6 (VHP)
Positionierungsaufgabe 2	Gruppe 3 (VPH), Gruppe 5 (HPV)	Gruppe 1 (PHV), Gruppe 6 (VHP)	Gruppe 2 (HVP), Gruppe 4 (PVH)
Positionierungsaufgabe 3	Gruppe 2 (HVP), Gruppe 6 (VHP)	Gruppe 3 (VPH), Gruppe 4 (PVH)	Gruppe 1 (PHV), Gruppe 5 (HPV)

Dieses Versuchsdesign entspricht einem vollständigen ausbalancierten Within-Subject-Versuchsdesign, da jede Zelle des Versuchsplans mit der gleichen Anzahl an Versuchsteilnehmern besetzt ist.

Vor jedem Experiment wurden den Teilnehmern die Interaktionstechniken vorgestellt. Darüber hinaus wurden je sechs Übungsaufgaben pro Interaktionstechnik in derselben Reihenfolge wie im Experiment gelöst, um Trainingseffekte, die während der Experimente auftreten, zu reduzieren.

Die Teilnehmer wurden vor jedem Aufgabenblock instruiert, die Aufgaben so schnell und so genau wie möglich zu lösen.

8.9 Auswertungsmethode

Zur Hypothesenüberprüfung wurden erneut Signifikanztests durchgeführt. Da das Versuchsdesign vollständig und ausbalanciert ist, konnte für die Auswertung der Ergebnisse eine Varianzanalyse (ANOVA, Anhang 12.6.1, S. 291) mit Messwiederholung eingesetzt werden. Zur Auswertung der ordinal skalierten Merkmale der Fragebögen wurde der Friedman-Test verwendet, ein

verteilungsfreies Verfahren für Messwiederholungen, das dem Wilcoxon-Signed-Ranks-Test ähnelt, jedoch für Versuchspläne mit mehr als zwei Bedingungen angewendet werden kann (Anhang 12.6.1, S. 291). Die Auswertung wurde mit dem Programm SPSS Version 15.0 vorgenommen.

8.10 Ergebnisse

8.10.1 Rotationsaufgabe

Die Auswertung der Ausführungsgeschwindigkeiten der Rotationsaufgabe ergab signifikante Unterschiede zwischen den drei Bedingungen ($F(2, 35)=70{,}61$; $p<0{,}001$; Abbildung 74). In der physischen Bedingung wurde die Rotationsaufgabe am schnellsten gelöst (M_P=2211 ms, SD_P=133,00 ms), signifikant schneller als in der hybriden Bedingung (um 1005 ms) und der virtuellen Bedingung (um 1429 ms). In der hybriden Bedingung ergaben sich die zweitschnellsten Ausführungsgeschwindigkeiten (M_H=3216 ms; SD_H=142,59 ms), signifikant schnellere als in der virtuellen Bedingung (um 424 ms). In der virtuellen Bedingung wurden die langsamsten Ausführungsgeschwindigkeiten erzielt (M_V=3640 ms; SD_V=174,01 ms).

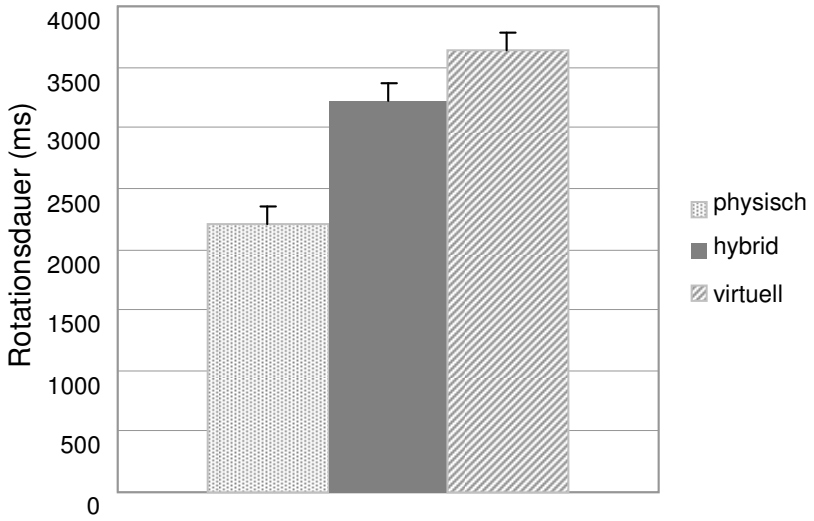


Abbildung 74: Geschwindigkeit (Ausführungsdauer) der Rotationsaufgabe.

Auch die Auswertung der Ausführungsgenauigkeit (des Fehlers) ergab signifikante Unterschiede zwischen den Bedingungen ($F(2, 35)=6{,}56$; $p<0{,}01$; vgl. Abbildung 75). In der physischen Bedingung lösten die Teilnehmer die Aufgaben am genauesten (M_P=15,83 °; SD_P=1,20 °), signifikant genauer (um 2.30 °) als in der virtuellen Bedingung und der hybriden Bedingung (um 3,38 °). Die virtuelle Bedingung wurden am zweitgenauesten ausgeführt (M_V=18,14 °; SD_V=1,068 °), jedoch wurde der Unterschied zur hybriden Bedingung nicht signifikant. In der hybriden Bedingung erzielten die Teilnehmer die ungenauesten Ergebnisse (M_H=19,21 °; SD_H=1,57 °).

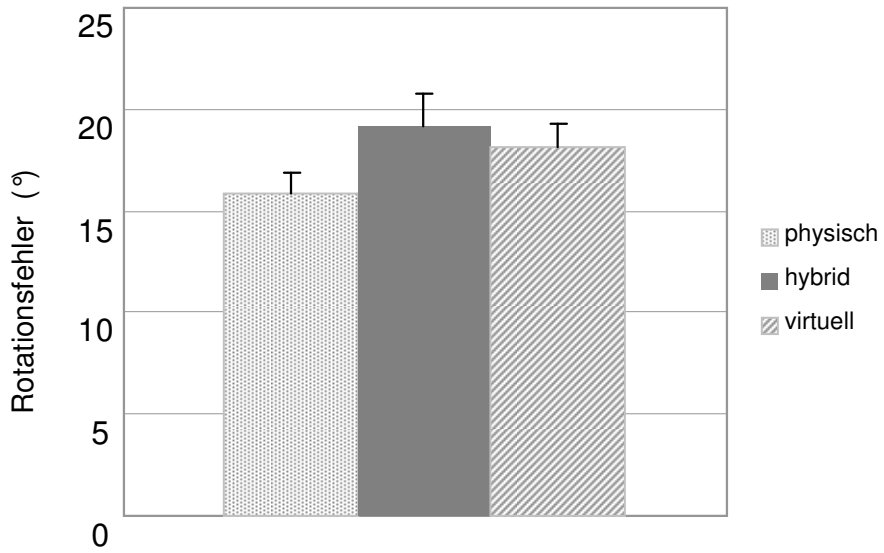


Abbildung 75: Genauigkeit (Fehler) der Rotationsaufgabe.

- In der Rotationsaufgabe ergaben sich sowohl für die Ausführungsgeschwindigkeit als auch -genauigkeit signifikante Vorteile der physischen Bedingung gegenüber der hybriden und virtuellen Bedingung.
- Außerdem ergaben sich in der hybriden Bedingung Geschwindigkeitsvorteile gegenüber der virtuellen Bedingung.

8.10.2 Positionierungsaufgabe

Für die Positionierungsaufgabe wurden wiederum signifikante Unterschiede der Ausführungsgeschwindigkeit zwischen den drei Bedingungen gefunden ($F(2, 35)=65{,}52$; $p<0{,}001$; Abbildung 76). Die Geschwindigkeit der Aufgabenausführung war in der physischen Bedingung am höchsten (M_P=1914 ms; SD_P=144,92 ms), signifikant höher als in der hybriden Bedingung (um 650 ms) und in der virtuellen Bedingung (um 1016 ms). In der hybriden Bedingung ergaben sich die zweithöchsten Ausführungsgeschwindigkeiten (M_H=2564 ms; SD_H=144,10 ms), welche signifikant höher waren als die in der virtuellen Bedingung (um 366 ms). In der virtuellen Bedingung ergaben sich die niedrigsten Ausführungsgeschwindigkeiten (M_V=2930 ms; SD_V=139,49 ms).

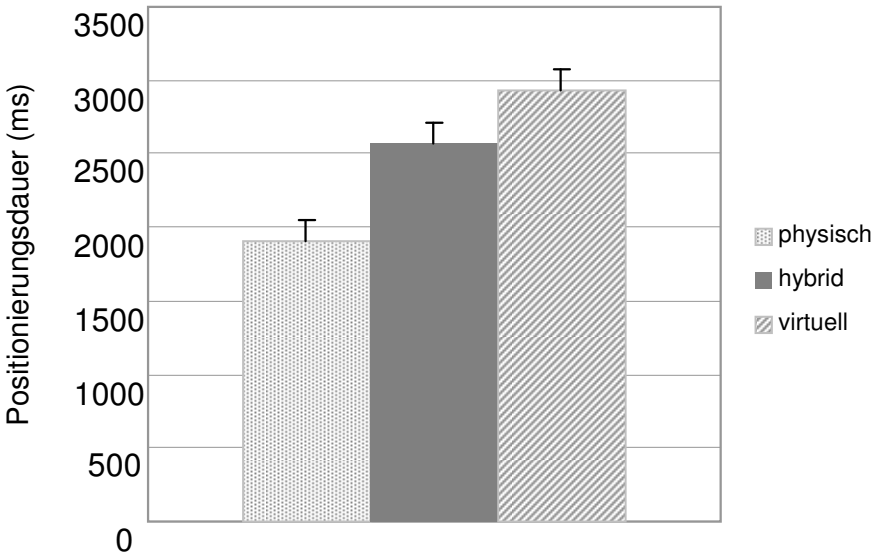


Abbildung 76: Geschwindigkeit (Ausführungsdauer) der Positionierungsaufgabe.

Die Ausführungsgenauigkeit (der Fehler) unterschied sich zwischen den Bedingungen ebenfalls signifikant ($F(2, 35)=39{,}75$; $p<0{,}001$; vgl. Abbildung 77). In der virtuellen Bedingung lösten die Teilnehmer die Aufgaben am genauesten ($M_V=3{,}3$ cm; $SD_V=0{,}2$ cm), 0,2 cm genauer als die der hybriden Bedingung; dieser Unterschied ist jedoch statistisch nicht signifikant. Am zweitgenauesten lösten die Teilnehmer die Aufgaben in der hybriden Bedingung ($M_H=3{,}5$ cm; $SD_H=0{,}1$ cm). Am ungenauesten wurden Aufgaben in der physischen Bedingung gelöst ($M_P=6{,}2$ cm, $SD_P=0{,}4$ cm).

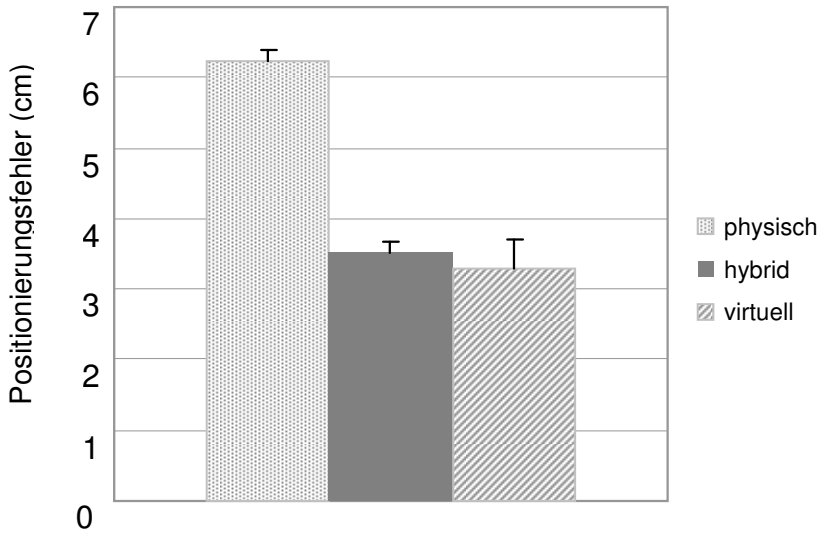


Abbildung 77: Genauigkeit (Fehler) der Positionierungsaufgabe.

- ▷ In der Positionierungsaufgabe ergaben sich für die Ausführungsgeschwindigkeit signifikante Geschwindigkeitsvorteile der physischen Bedingung gegenüber der hybriden und virtuellen Bedingung.
- ▷ Außerdem ergaben sich in der hybriden Bedingung Geschwindigkeitsvorteile gegenüber der virtuellen Bedingung.
- ▷ Die Positionierungsaufgabe wurde von den Teilnehmern in der physischen Bedingung am ungenauesten gelöst.

8.10.3 Einschätzung der pragmatischen und hedonistischen Qualitäten durch die Benutzer

In die Auswertung des AttrakDiff-Fragebogens flossen die Antworten der Teilnehmer zu beiden Aufgaben ein (vgl. Abbildung 78). Die Auswertung der ANOVA mit Messwiederholung (Anhang 12.6.1, S. 291) ergab signifikante Unterschiede in der pragmatischen Qualität PQ ($F_{PQ}(2, 35)=44{,}77$; $p_{PQ}<0{,}001$) und der hedonistischen Qualität Stimulation HQ-S ($F_{HQ\text{-}S}(2, 35)=55{,}22$; $p_{HQ\text{-}S}<0{,}001$):

Die *Pragmatische Qualität* der physischen Objekte wurde von den Teilnehmern in beiden Aufgaben am höchsten eingeschätzt ($M_P=5{,}22$, $SD_P=0{,}55$), gefolgt von derjenigen hybrider Objekte ($M_H=3{,}98$, $SD_H=0{,}86$) und virtueller Objekte ($M_V=3{,}95$, $SD_V=0{,}95$). Der Unterschied zwischen der hybriden und virtuellen Bedingung wurde jedoch statistisch nicht signifikant.

Für die hedonistische Qualität *Stimulation* ergaben sich in der virtuellen Bedingung die höchsten Werte ($M_V=4{,}92$, $SD_V=0{,}56$), gefolgt von denen der hybriden Bedingung ($M_H=4{,}27$, $SD_H=0{,}63$) und der physischen Bedingung ($M_P=3{,}81$, $SD_P=0{,}47$).

Die Unterschiede in der hedonistischen Qualität *Identifikation* HQ-I und auch der *Gesamtattraktivität* ATTR wurden statistisch nicht signifikant: Die hedonistische Qualität *Identifikation* virtueller Objekte ($M_V=4{,}03$, $SD_V=0{,}67$) wurde höher eingeschätzt als die physischer ($M_P=3{,}88$, $SD_P=0{,}52$) und hybrider Objekte ($M_H=3{,}68$, $SD_H=0{,}79$). Die *Gesamtattraktivität* virtueller Objekte ($M_V=4{,}27$, $SD_V=0{,}69$) wurde annähernd gleich zu der physischer ($M_P=4{,}26$, $SD_P=0{,}69$) und hybrider Objekte bewertet ($M_H=3{,}94$, $SD_H=0{,}77$).

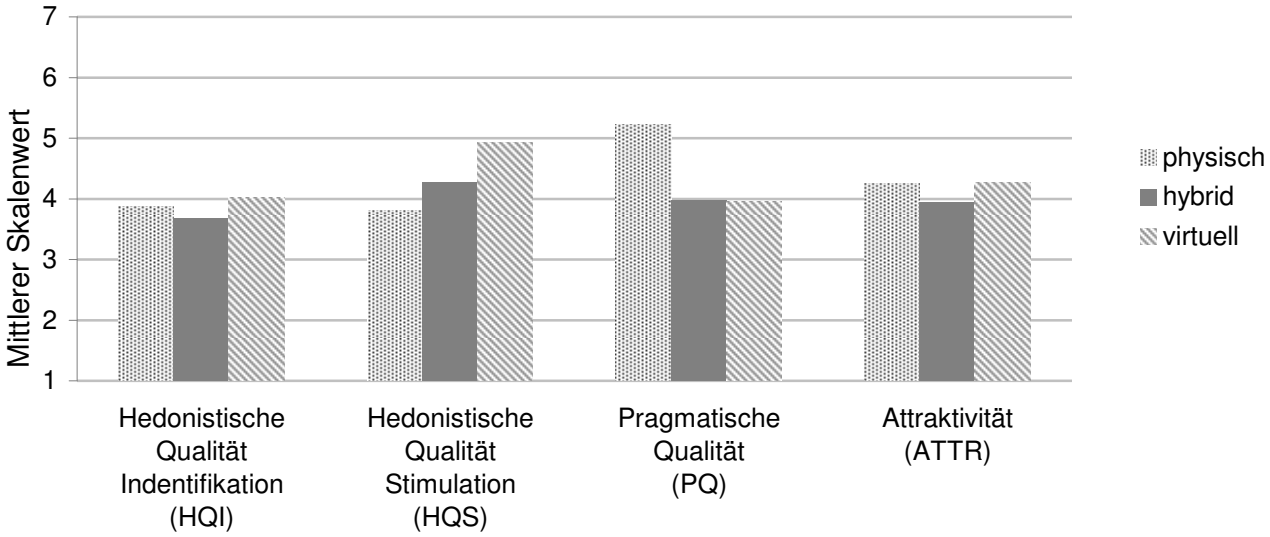


Abbildung 78: Ergebnisse des AttrakDiff-Fragebogens.

- ▷ Die pragmatische Qualität physischer Objekte wurde in beiden Aufgaben höher als diejenige hybrider und virtueller Objekte eingeschätzt.
- ▷ Die hedonistische Qualität Stimulation ergab für virtuelle Objekte die höchste Bewertung, gefolgt von hybriden und physischen Objekten.

8.10.4 Wahrgenommene Objektintegrität, Kontrollierbarkeit und Beanspruchung

Die Auswertung der Antworten zur wahrgenommenen Einheit der Interaktionsobjekte erfolgte mittels eines Friedman-Tests (Anhang 12.6.1, S. 291) und ergab signifikante Unterschiede zwischen den drei Bedingungen ($\chi^2(2)=43{,}30$; $p<0{,}001$; vgl. Tabelle 17). Das hybride Objekt wurde als am wenigsten *einheitlich* eingeschätzt, die Einheitlichkeit der physischen und virtuellen Objekte dagegen wesentlich höher. Die Frage nach der wahrgenommenen Einheit wurde für die „physische Einheit" und die „visuelle Einheit" wiederholt, hier ergaben sich gleiche Rangreihenfolgen, bei letzterer wurde der Unterschied zwischen der virtuellen und der physischen Bedingung jedoch nur tendenziell signifikant ($\chi^2=3{,}26$; $p=0{,}07$).

- ▷ Die wahrgenommene Objekteinheit hybrider Objekte war unter allen drei Bedingungen am geringsten.

Weiterhin ergaben sich signifikante Effekte auf die Fragen, ob sich die Teilnehmer im Umgang mit der Interaktionstechnik *sicher* gefühlt hätten ($\chi^2(2)=24{,}54$; $p<0{,}001$; vgl. Tabelle 17) bzw. ob sie mit der Interaktionstechnik die virtuelle Umgebung gut kontrollieren konnten ($\chi^2(2)=8{,}40$; $p<0{,}05$; vgl. Tabelle 17). Hier wurde jeweils die physische Bedingung als am besten geeignet ein-

geschätzt, gefolgt von den hybriden und virtuellen Bedingungen. Die Unterschiede zwischen der virtuellen und der hybriden Bedingung wurden jedoch jeweils nicht statistisch signifikant.

Dieselbe Tendenz ergab sich sowohl auf die Frage nach der *geistigen Beanspruchung* ($\chi^2(2)=9{,}19$; $p<0{,}01$; vgl. Tabelle 17) als auf die Frage nach der *körperlichen Beanspruchung* durch die Interaktionstechniken ($\chi^2(2)=6{,}74$; $p<0{,}05$; vgl. Tabelle 17). Auch hier wurden die Unterschiede zwischen der virtuellen und der hybriden Bedingung statistisch nicht signifikant

▷ Hinsichtlich der Sicherheit im Umgang mit der Interaktionstechnik, deren Kontrollierbarkeit und die durch die Interaktionstechnik verursachte geistige und körperliche Beanspruchung ergaben sich signifikante Vorteile der physischen Bedingung gegenüber der hybriden und virtuellen Bedingung, die sich untereinander statistisch nicht unterschieden.

Tabelle 17: Auswertung des Fragebogens zu den drei Versuchsbedingungen.

	Physische Bedingung		**Hybride Bedingung**		**Virtuelle Bedingung**	
	Median	*IQR*	*Median*	*IQR*	*Median*	*IQR*
Einheit der Interaktionsobjekte - gesamt	5,00	5,00-5,00	2,00	2,00-4,00	5,00	3,25-5,00
Einheit der Interaktionsobjekte - visuell	5,00	5,00-5,00	2,00	2,00-3,00	5,00	4,00-5,00
Einheit der Interaktionsobjekte - physisch	5,00	5,00-5,00	2,00	2,00-3,00	3,00	2,00-4,00
Sicherheit im Umgang mit der Interaktionstechnik	4,00	4,00-5,00	3,00	2,00-4,00	3,00	3,00-4,00
Möglichkeit, die virtuelle Umgebung mit der Interaktionstechnik zu kontrollieren	3,00	3,00-4,00	3,00	3,00-4,00	3,00	2,25-4,00
Geistige Beanspruchung durch die Interaktionstechnik	2,00	2,00-3,00	2,00	2,00-3,00	2,00	2,00-3,00
Körperliche Beanspruchung durch die Interaktionstechnik	2,00	1,00-3,00	2,00	2,00-3,75	2,00	1,00-3,75
Eignung der Interaktionstechnik für die Positionierungsaufgabe	4,00	2,25-5,00	4,00	3,00-4,00	4,00	3,00-4,00
Eignung der Interaktionstechnik für die Rotationsaufgabe	5,00	4,00-5,00	3,00	3,00-4,00	3,00	3,00-4,00

Auf die Frage, ob die Interaktionstechnik gut zur Lösung der Aufgabe geeignet wäre, ergaben sich nur für die Rotationsaufgabe statistisch signifikante Unterschiede ($\chi^2(2)=38{,}12$; $p<0{,}001$; vgl. Tabelle 17), in der Positionierungsaufgabe wurden dagegen keine signifikanten Unterschiede ermittelt ($\chi^2(2)=0{,}835$; $p=0{,}66$; vgl. Tabelle 17).

▷ Die Eignung der physischen Interaktionstechnik zur Lösung der Aufgabe wurde durch die Teilnehmer nur für die Rotationsaufgabe höher als die der hybriden und virtuellen Bedingung eingeschätzt. Weitere statistische Unterschiede ergaben sich nicht.

8.10.5 Beobachtetes Benutzerverhalten

Bei einigen Teilnehmern ließen sich während der Suche nach der korrekten Objektorientierung in der Rotationsaufgabe auffällige, unergonomische Handbewegungen und -stellungen beobachten (vgl. Abbildung 79). Dieses Verhalten wurde insbesondere in der Übungsphase beobachtet, und zwar dann, wenn die Teilnehmer die virtuelle Interaktionstechnik nutzten; sehr selten auch in der hybriden Bedingung und niemals in der physischen Bedingung.

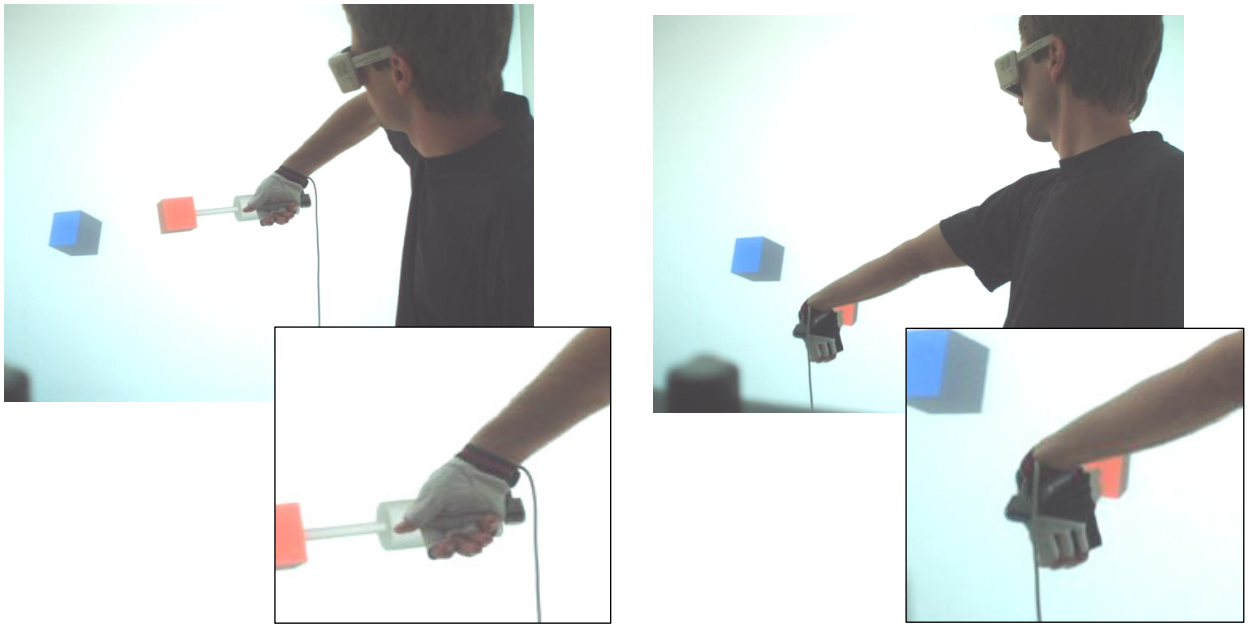


Abbildung 79: Auffällige, unergonomische Handhaltung während der Rotationsaufgabe (nachgestellt).

8.10.6 Einfluss der Vorerfahrung und des räumlichen Vorstellungsvermögens

Zwischen den Ergebnissen des 3D-Würfeltests und den Antworten zur Vorerfahrung konnten keine statistisch signifikanten Effekte auf die Lösungsgenauigkeit und die Zeitdauer, die zur Lösung aufgewandt werden musste sowie die Ergebnisse des AttrakDiff-Fragebogens ermittelt werden.

8.11 Diskussion

8.11.1 Effizienz der Interaktion (Geschwindigkeit, Hypothese 2.1)

Die Manipulation physischer Objekte stellte sich im Vergleich zu virtuellen und hybriden Objekten in beiden Aufgaben als die schnellste heraus. Dieses Ergebnis ist konsistent mit den Untersuchungen von Ware und Balakrishan (1994), die ermittelt hatten, dass die Ausführungsgeschwindigkeit primär von der Bildwiederholrate (engl. *display update rate*) und von der Verzögerung (engl. *lag*) abhängig ist. Da die Bildwiederholrate physischer Objekte vernachlässigbar hoch und die Darstellungsverzögerung vernachlässigbar gering ist, ergeben sich daraus Geschwindigkeitsvorteile für die Manipulation physischer Objekte gegenüber virtuellen Objekten.

Auch gegenüber hybriden Objekten ergaben sich Geschwindigkeitsvorteile der physischen Bedingung, da der für die Aufgabenlösung relevante Anteil der Objekte (die Würfel bzw. Kugeln) virtuell repräsentiert waren. Interessanter Weise war die Interaktionsgeschwindigkeit in der hybriden Bedingung um 8,8 Prozent höher als in der virtuellen. Dieser Effekt könnte auf das passive haptische Feedback durch den physischen Objektgriff zurückgeführt werden, welches während der Bewegungsausführung zusätzliche Hinweise (engl. *cues*) zur Lage des Objekts und damit zusätzliche Informationen zur Bewegungskoordination bereitgestellt hat.

Die Unterschiede in der Ausführungsgeschwindigkeit der Rotationsaufgabe zwischen der physischen und der hybriden Bedingung (1005 ms) und der physischen und der virtuellen Bedingung (1430 ms) waren dreimal größer als in der Studie von Ware and Rose (dort 450 ms; Ware & Rose, 1999). Grund dafür ist wahrscheinlich die um 25 bis 50 ms höhere Verzögerung in dieser Studie, welche einen Verzögerungseffekt auf die Auge-Hand-Koordination gehabt haben könnte (vgl. Ware & Balakrishan, 1994). Weiterhin hatten die Teilnehmer in der vorliegenden Studie längere Rotationsbewegungen auszuführen, da die Referenzobjekte an Stäben angebracht und die Interaktionsobjekte dadurch insgesamt größer waren als diejenigen in der Studie von Ware und Rose (hier bis zu 29 cm, dort 13 cm).

Aufgrund dieser Untersuchung wird die Hypothese 2.1, nach der hybride Objekte effizienter, d. h. schneller manipuliert werden können als physische und virtuelle Objekte, nur im Vergleich zwischen hybriden und virtuellen Objekten unterstützt. Im Vergleich zwischen physischen und hybriden Objekten wird dagegen durch die Ergebnisse die Nullhypothese unterstützt.

8.11.2 Effektivität der Interaktion (Genauigkeit, Fehler, Hypothese 2.2)

Die Hypothese 2.2 war aufgrund der Erwartung formuliert worden, dass sich hybride Objekte am genauesten manipulieren lassen, da deren Referenzobjekt auf die selbe Weise repräsentiert ist wie das Stimulusobjekt, und so ein einfacherer Abgleich möglich sein sollte als mittels physischer Objekte. Ebenso wurde angenommen, dass der physische Griff der hybriden Objekte im Vergleich zu rein virtuellen Objekten zusätzliche Möglichkeiten zur präzisen Positionierung und Orientierung bereitstellen würde. Die Ergebnisse zeigen jedoch in keiner Aufgabe Genauigkeitsvorteile der hybriden Objekte gegenüber virtuellen Objekten.

Verglichen mit den physischen Objekten ergaben sich in der Rotationsaufgabe klare Nachteile der hybriden und virtuellen Objekte. Offensichtlich ist unter den beschriebenen Versuchsbedingungen ein einfacher Abgleich der Orientierung virtueller Stimulus- und physischer Referenzob-

jekte möglich und der Einfluss visueller Störfaktoren und des Rauschens auf die Aufgabenlösung gering gewesen.

Hieraus lässt sich schlussfolgern:

▷ Für Interaktionsaufgaben, die vorwiegend aus Rotationsteilaufgaben bestehen, stellen physische Interaktionsobjekte die effizienteste und effektivste Variante dar.

Weiterhin könnte zu den ungenauen Ergebnissen in den hybriden Bedingungen beigetragen haben, dass zwischen dem physischen Griff und der virtuellen Stange des hybriden Objekts ein sichtbarer Spalt bestand, der von den Teilnehmern auch wahrgenommen und von 16,7 % der Teilnehmer entsprechend kritisiert wurde. Durch den Einsatz genauerer Trackingverfahren (beispielsweise optischer Trackingverfahren) sollte dieser Spalt reduziert und die Benutzerleistung in der hybriden Bedingung gesteigert werden können.

In der Positionierungsaufgabe zeigte sich ein anderes Bild, hier schnitt die physische Bedingung als die mit Abstand ungenaueste ab. Offenbar waren die Vergleichsmöglichkeiten zwischen dem physischen Referenzobjekt und dem virtuellen Stimulusobjekt nicht ausreichend, um eine Genauigkeit zu erreichen, die sich den anderen Bedingungen annäherte. Als wahrscheinlich wirksamster Störfaktor kann hier der Akkommodations-Konvergenz-Konflikt angenommen werden, der beim Abgleich zwischen physischem Stimulus- und virtuellem Referenzobjekt zum Tragen gekommen ist.

Zwar bemerkten die Teilnehmer in der hybriden Bedingung auch während der Positionsaufgabe den Spalt zwischen physischem Griff und virtuellem Stab, bzw. in der virtuellen Bedingung zwischen dem Handschuh und dem virtuellem Griff, und äußerten sich wiederum entsprechend. Offenbar war das virtuell repräsentierte visuelle Feedback über die Position des Referenzobjekts in der Positionierungsaufgabe jedoch besser als das physische Referenzobjekt geeignet, dessen räumliche Lage zu bestimmen und Korrekturbewegungen zu koordinieren.

Zusammenfassend lässt sich unter Berücksichtigung der Geschwindigkeitsnachteile der virtuellen Bedingung schlussfolgern:

▷ Für Interaktionsaufgaben, die vorwiegend aus Positionierungsteilaufgaben bestehen, stellen hybride Interaktionsobjekte die effizienteste und effektivste Variante dar.

8.11.3 Benutzerzufriedenheit (Hypothese 2.3)

Ein Teilnehmer vermerkte auf dem Fragebogen „Ich mochte das hybride Objekt am meisten. Ich hatte etwas in der Hand und war trotzdem Teil des Virtuellen“. Die Ergebnisse des AttrakDiff-Fragebogens zeigen jedoch, dass die meisten Teilnehmer die physische Bedingung als am besten für die Erledigung der Aufgaben angesehen haben (pragmatische Qualität, PQ). Diese Einschätzung korrespondiert mit der hohen Geschwindigkeit und der hohen Rotationsgenauigkeit in der

physischen Bedingung. Aufgrund dieser Ergebnisse kann außerdem davon ausgegangen werden, dass die Teilnehmer den großen Fehler der physischen Bedingung in der Positionierungsaufgabe nicht bemerkt haben.

Hybride Objekte scheinen einen Anteil des stimulierenden Charakters der virtuellen Objekte „geerbt" zu haben und liegen in dieser Dimension vor den physischen Objekten. Stimulierende Effekte sind für kreative schöpferische Prozesse wesentlich (Abschnitt 3.2, S. 47), daher versprechen hybride und virtuelle Objekte, kreative Prozesse in virtuellen Umgebungen stärker zu stimulieren als physische Objekte.

▷ Hybride und virtuelle Objekte stimulieren die Benutzer stärker als rein physische Objekte.

8.11.4 Einfluss der Vorerfahrung auf die Ergebnisse

Die Tatsache, dass kein Einfluss der Vorerfahrung im Umgang mit Computern auf die Ergebnisse gefunden wurde, spricht dafür, dass in diesem Experiment von herkömmlichen 2D-/3D-Interaktionstechniken abgewichen wurde und statt dessen größere Nähe zur alltäglichen, vertrauten Interaktion mit physischen Objekten bestand. Dies ist insbesondere wegen der hohen Anzahl von Versuchspersonen mit Vorerfahrung in CAD-Software erstaunlich (neun Teilnehmer bzw. 25 Prozent). Aufgrund der geringen Teilnehmerzahl mit Erfahrungen in 3D-Computerspielen konnten keine Abhängigkeiten von diesem Faktor ermittelt werden. Dies steht im Kontrast zu anderen Studien (z. B. Wingrave et al., 2005), die Korrelationen zwischen Vorerfahrung mit rechnerbasierten 2D- und 3D-grafischen Darstellungen und spielerischem Computergebrauch auf der einen Seite, und Ausführungszeiten in immersiven Zeigeaufgaben auf der anderen Seite ermitteln konnten. Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass die Interaktionstechniken in jenen Studien kommando-basiert und künstlicher waren als in dieser Studie und damit herkömmlichen Computerinteraktionen stärker ähnelten, wodurch dort ein Transfer erleichtert wurde.

8.11.5 Beobachtetes Benutzerverhalten

Die unergonomischen Handbewegungen in der virtuellen Bedingung könnten auf den ausschließlichen Einsatz der Hauptmuskelgruppen des Armes in dieser Bedingung zurückzuführen sein (vgl. Zhai et al., 1996). Ähnliche Beobachtungen konnten auch Wingrave et al. (2005) berichten, die strahlenbasierte Selektionstechniken mittels Datenhandschuhen und Head Mounted Displays (HMDs) untersuchten. Sie beobachteten, dass Teilnehmer ihre Schultern nach hinten drehten und das Handgelenk verdrehten. Wie in der vorliegenden Studie traten diese Beobachtungen auch bei Wingrave et al. mit wachsender Praxis der Teilnehmer nicht mehr auf. Es ist daher vorstellbar, das dass multisensorische Feedback physischer Objekte unmittelbar Bewegungsmuster anstößt, die in der virtuellen Bedingung durch das Fehlen des Feedbacks nicht ausgelöst werden. Während des Erstgebrauchs scheinen die Affordances (dt. der Aufforderungscharakter, vgl. Gibson, 1979) virtueller und physischer Objekte daher sehr verschieden zu sein. Auch in diesem Punkt scheint sich die teilweise physische Repräsentation positiv auf die Gebrauchseigenschaften hybrider Objekte auszuwirken.

8.11.6 Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass Benutzer mit hybriden Objekten trotz deren uneinheitlicher Repräsentation aus virtuellen und physischen Anteilen interagieren können. Zwar gibt es bei der Interaktion mit physischen Objekten Geschwindigkeitsvorteile und in der Rotation Genauigkeitsvorteile gegenüber hybriden (und virtuellen) Objekten. Jedoch sind hybride und virtuelle Objekte in solchen Aufgaben überlegen, in denen eine genaue Positionierung notwendig ist.

Die Ergebnisse der Studie lassen erkennen, dass basale Interaktionen mittels rein physisch repräsentierter Interaktionswerkzeuge deutlich schneller ausgeführt werden können als mittels rein virtuell repräsentierter Objekte (die mittels eines Datenhandschuhs manipuliert wurden). Hybride Objekte, die physisch manipuliert werden könnten, deren für die Aufgabenerledigung relevanter Anteil jedoch virtuell repräsentiert war, lagen in Bezug auf die Ausführungsgeschwindigkeit zwischen physischen und virtuellen Objekten

Daher lässt sich schlussfolgern:

- Zwar war die wahrgenommene Objekteinheit hybrider Objekte unter allen drei Bedingungen am geringsten, ihre Interaktionseigenschaften übertrafen jedoch diejenigen physischer Objekte (bezogen auf die Genauigkeit der Positionierung) und virtueller Objekte (bezogen auf die Geschwindigkeit in beiden Aufgaben).

- Hybride Objekte scheinen für solche Aufgaben, in denen sowohl Rotations- als auch Positionierungsteilaufgaben zu bearbeiten sind, einen effizienten und effektiven Mittelweg zwischen virtuellen und physischen Objekten zu ermöglichen.

In dieser Studie wurden basale Interaktionsaufgaben (engl. *canonical manipulation tasks*) untersucht. Um die Ergebnisse auf praxisnahe Anwendungen übertragen zu können, beispielsweise VR-basierte Montage- und Demontagesimulationen, interaktive Design-Reviews oder Trainingsanwendungen, müssen Aufgabenanalysen durchgeführt, und die Anteile von Positionierungs- und Rotationstätigkeiten ermittelt werden. Ob sich die Ergebnisse auf den Anwendungsfall des immersiven dreidimensionalen Skizzierens übertragen lassen, wird in der folgenden Studie 4 untersucht.

8.12 Zusammenfassung

Dieses Kapitel fasste eine vergleichende Studie verschieden repräsentierter Interaktionsobjekte für basale Manipulationen in virtuellen Umgebungen zusammen (physische, hybride und virtuelle Interaktionsobjekte). Die Studie wurde in einer immersiven VR-CAVE durchgeführt. Es nahmen 36 Personen teil, welche jeweils Rotations- und Positionierungsaufgaben zu lösen hatten.

Die Auswertung der Studie ergab:

- Es bestehen deutliche Geschwindigkeitsvorteile bei der Interaktion mit physischen Objekten gegenüber hybriden und virtuellen Objekten. Auch die Interaktion mittels hybrider Objekte erfolgt schneller als diejenige mittels rein virtueller Objekte.
- Die Ausführungsgenauigkeit für Rotationsaufgaben ist mit physischen Objekten am höchsten und für Positionierungsaufgabe am geringsten. Die Interaktion mittels hybrider und virtueller Objekte ist für beide Aufgabentypen etwa gleich genau.
- Virtuelle Objekte werden als am meisten stimulierend empfunden, hybride Objekte werden stimulierender als physische Objekte empfunden.

Ob sich Unterschiede der Stimulation, Interaktionsgeschwindigkeit und -genauigkeit auch in einer VR-Anwendung des immersiven dreidimensionalen Skizzierens zeigen, wird in der folgenden Studie 4 untersucht. Diese Untersuchung soll wesentliche Hinweise für die grundsätzliche Gestaltung von Interaktionswerkzeugen für das immersive Skizzieren liefern.

9
Studie 4: Untersuchung physischer, hybrider und virtueller Werkzeuge im immersiven dreidimensionalen Skizzierprozess

Für sich sind die bloße Hand und der Intellekt nur wenig wert,
perfektioniert wird alles erst durch Werkzeuge und Hilfsmittel
Luria & Vygotsky (1992, S. 117)

Nachdem in Studie 2 Anhaltspunkte für eine Wirksamkeit des immersiven Skizzierens auf den kreativen Entwurfsprozess gefunden wurden, sollten in Studie 4 Gestaltungsvarianten immersiver Skizzierwerkzeuge untersucht werden. Dabei stand nicht die Formgestaltung der Werkzeuge, beispielsweise nach ästhetischen, ergonomischen und produktionsgerechten Kriterien im Vordergrund – diese Aufgabe fällt in das Tätigkeitsgebiet von Produktdesignern und wurde beispielsweise von Zöllner (2007; 2008) bereits erfolgreich gelöst. Stattdessen wurde – aufbauend auf den Ergebnissen der dritten Studie – die Platzierung der Schnittstelle zwischen virtueller Umgebung, Werkzeug, und Anwender variiert.

In Studie 3 wurde ein Einfluss der Werkzeuggestaltung auf die Ausführungsgeschwindigkeit und -genauigkeit bei einfachen Manipulationsaufgaben wie Rotation und Positionierung gefunden (Kapitel 8). Da Skizzierhandlungen aus solchen einfachen Bewegungen zusammengesetzt sind, ist auch bei der Variation der Gestaltung von Interaktionswerkzeugen ein Effekt auf den Skizzierprozess und das Skizzierergebnis zu erwarten. Durch den stark reflexiven Charakter des Skizzierens aus Zeichen (Externalisieren) und Bertachten (Internalisieren), können sich die Aufgabenanteile jedoch verschieben und andere Effekte als bei der Ausführung basaler Manipulationen auftreten.

Durch die Studie 4 sollte daher untersucht werden, ob sich durch Variierung der Interaktionstechnik (physisch, hybrid, virtuell) Effekte auf den Skizzierprozess und die Güte der Skizzen ergeben und ob die Erkenntnisse zu hybriden, realen und virtuellen Objekten der Studie 3 auch auf Skizzierwerkzeuge übertragbar sind.

9.1 Hypothesen

In Fortführung der Studie 3 wurde in dieser Studie untersucht, ob Hinweise auf die in der Hypothese 3 formulierten Effekte einer Verschiebung der Interaktionsschnittstelle zwischen virtueller Umgebung, Werkzeug und Anwender auf kreative Entwurfs- und Skizzierprozesse gefunden werden können (Abschnitt 6.5, S. 140). Dazu wurden wiederum Unterhypothesen gebildet:

Hypothese 3.1: Hybride Skizzierwerkzeuge verbinden physische Manipulierbarkeit und visuelle Integration in virtuellen Umgebungen unter den bestehenden technischen Bedingungen optimal. Die für die Steuerung (engl. *control*) hybrider Werkzeuge während der Skizzierbewegung benötigte Aufmerksamkeit ist daher geringer als die für die Steuerung rein virtueller und rein physischer Werkzeuge. Daher wird – da während des Skizzierprozesses mehr Aufmerksamkeit bei der Sachaufgabe verbleibt – mittels hybrider Skizzierwerkzeuge das höchste Unterstützungspotenzial erreicht.

Hypothese 3.2: Hybride Skizzierwerkzeuge verbinden physische Manipulierbarkeit und visuelle Integration in virtuellen Umgebungen unter den bestehenden technischen Bedingungen optimal. Sie ermöglichen daher, im Vergleich zu rein virtuellen und rein physischen Werkzeugen, flüssigere und ungestörtere immersive Skizzierprozesse.

Hypothese 3.3: Virtuelle und hybride Objekte werden in virtuellen Umgebungen stimulierender als physische Objekte wahrgenommen. Virtuelle und hybride Skizzierwerkzeuge haben daher auch einen stimulierenden Einfluss auf immersive Skizzierprozesse.

9.2 Interaktionstechniken

Diese Studie wurde in derselben technischen Umgebung wie die Studien 2 und 3 ausgerichtet, einer VR-CAVE mit fünf Rückprojektionsflächen. Es kam dasselbe immersive 3D-Skizziersystem wie in Studie 2 zum Einsatz (Abschnitt 7.2, S. 144, Anhang 12.1, S. 274), jedoch wurden die zur Verfügung stehenden Stifte variiert. Ebenso wie in Studie 2 wurde nur das linienbasierte Skizzieren untersucht. Auch die „Rückgängig" Funktion (engl. *undo, history*) stand zur Verfügung.

Als unabhängige Variable wurde in den Versuchbedingungen die Repräsentation des Stiftes variiert. Alle Varianten waren mit einem Kraftsensor ausgestattet. Durch Druck auf diesen wurde das Abtragen der „virtuellen Tinte" initiiert und die Strickstärke variiert. Zur Bestimmung der Position und Orientierung der Skizzierwerkzeuge wurde in allen drei Bedingungen wiederum ein magnetischer Sensor (Ascension MotionStar-Trackingsystem) verwendet.

- In der physischen Bedingung war der Stift vollständig physisch repräsentiert (vgl.
- Abbildung 80). Der Kraftsensor war im unteren Bogen des Stiftes, der magnetische Sensor am dem Benutzer zuwandten Ende des Stiftes angebracht. Der Akkommodations-Konvergenz-Konflikt sowie die Unterschiede der Repräsentation (Kontrast, Auflösung, Verzögerungen etc.; Abschnitt 4.4.1, S. 85) traten in dieser Bedingung zwischen Skizzierwerkzeug und virtueller Umgebung auf.

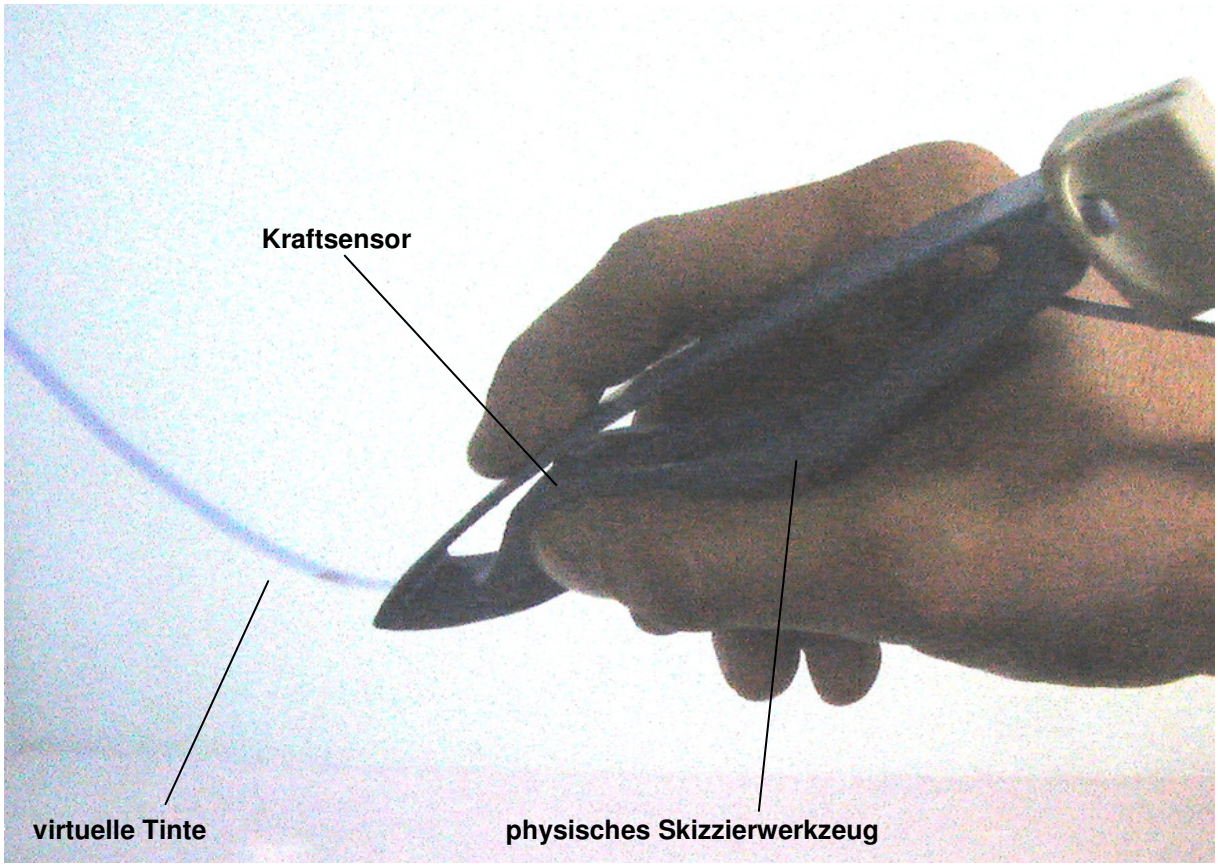


Abbildung 80: Skizzierwerkzeug in der physischen Bedingung.

- In der *hybriden* Bedingung bestand das Skizzierwerkzeug aus einem virtuellen und einem physischen Teil (vgl.
- Abbildung 81). Der hintere, greifbare Teil des Stiftes wurde physisch, die Stiftspitze virtuell in der gleichen Weise wie die „virtuelle Tinte“ repräsentiert. Der Kraftsensor war wie in der hybriden Variante im unteren Bogen des Stiftes, der magnetische Sensor am dem Benutzer zuwandten Ende des Stiftes angebracht. Der Akkommodations-Konvergenz-Konflikt sowie die Unterschiede der Repräsentation traten in dieser Bedingung innerhalb des Skizzierwerkzeugs auf.

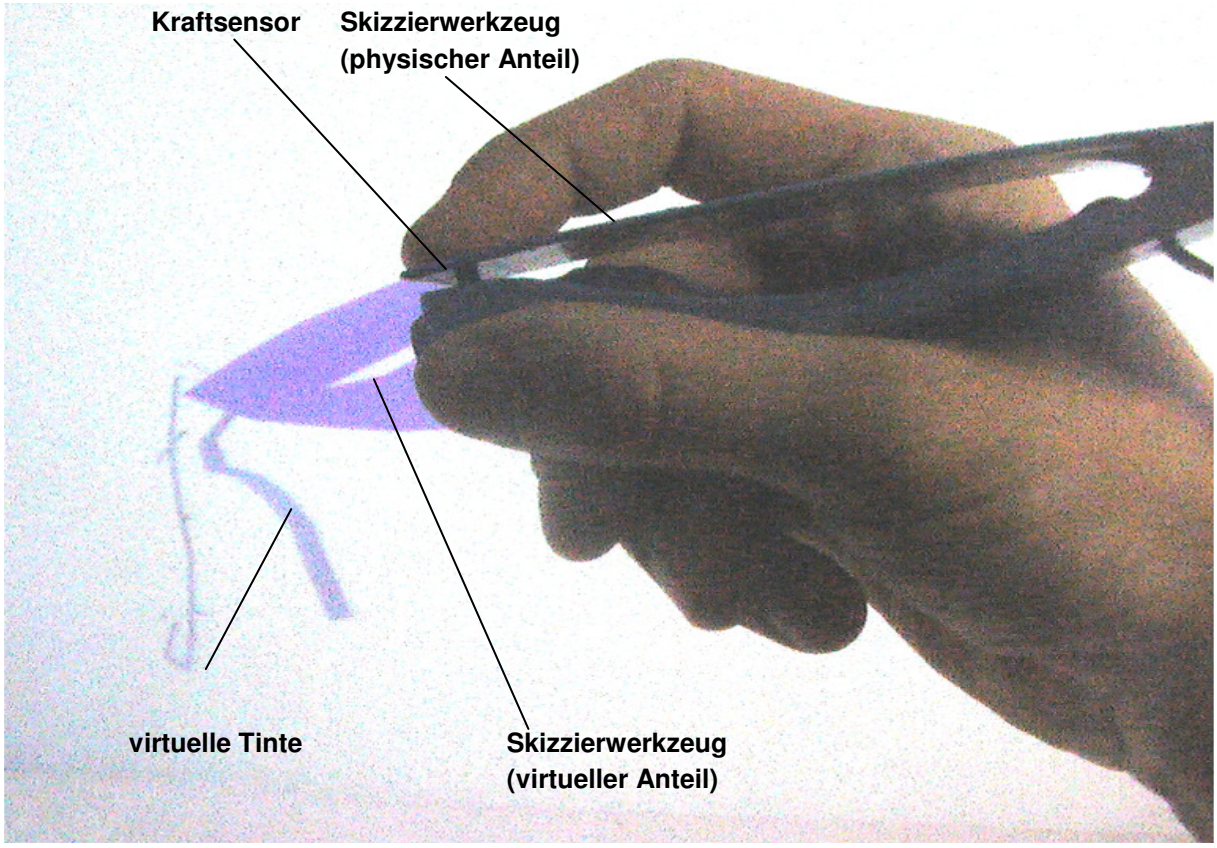


Abbildung 81: Skizzierwerkzeug in der hybriden Bedingung.

- In der *virtuellen* Bedingung wurde der Stift vollständig virtuell repräsentiert (vgl. Abbildung 82). Die Teilnehmer trugen – wie in den Studien 2 und 3 – einen Handschuh, an dessen unterem Ende der magnetische Sensor angebracht war. Der Kraftsensor war am Daumen des Handschuhs angebracht, am Zeigefinger befand sich ein Plättchen, welches zum Zeichnen auf den Kraftsensor gedrückt werden musste. Der virtuelle Stift wurde neben die Position der Hand in Richtung der Handinnenfläche projiziert. Der Akkommodations-Konvergenz-Konflikt sowie die Unterschiede der Repräsentation traten in dieser Bedingung zwischen Skizzierwerkzeug und der Hand des Benutzers auf.

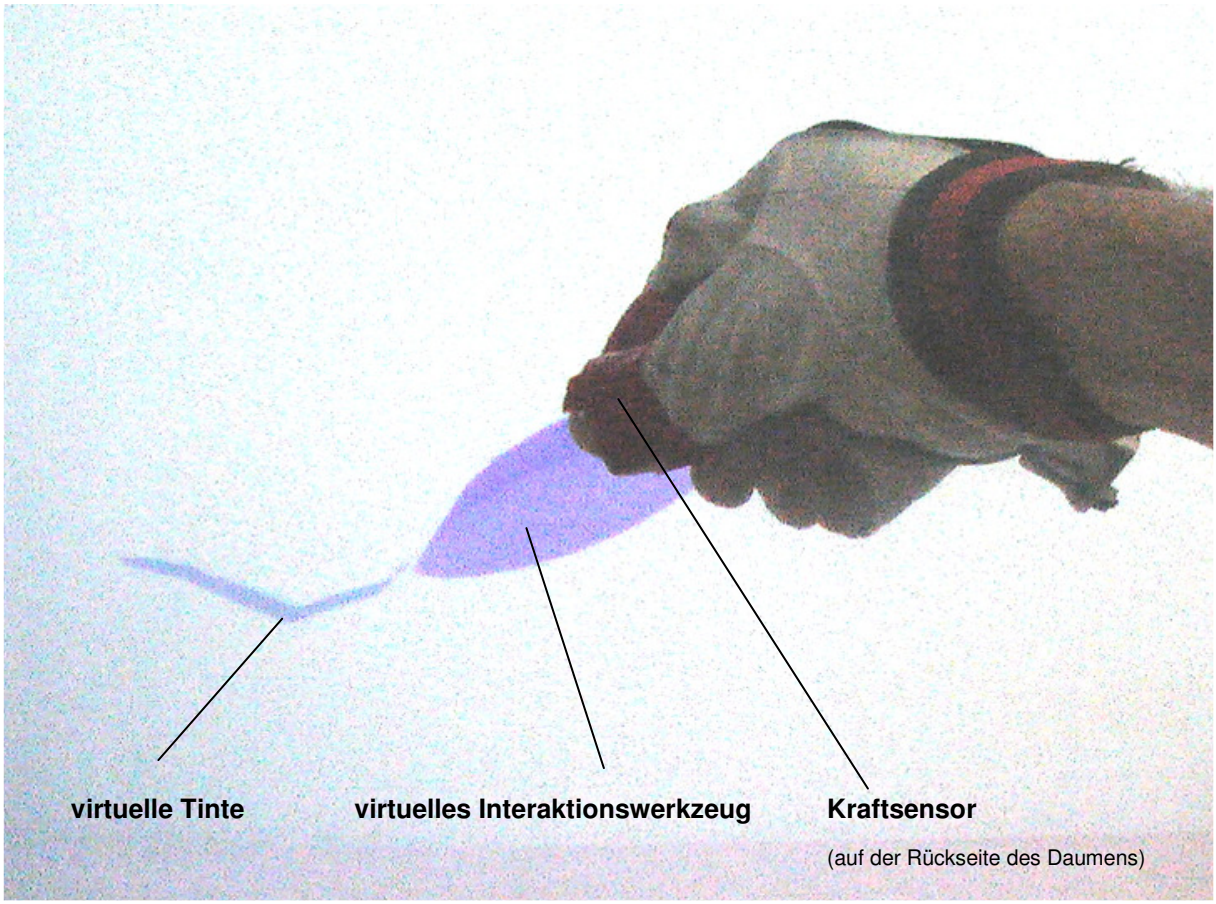


Abbildung 82: Skizzierwerkzeug in der virtuellen Bedingung.

Während allen drei Bedingungen war es den Teilnehmern gestattet, den gesamten Raum der CAVE zum Skizzieren zu nutzen (vgl. 3D-Bedingung in Studie 2, Abschnitt 7.2, S. 144ff). Weiterhin standen den Teilnehmern während der gesamten Studie alternativ Papier und Bleistift auf einem Tisch unmittelbar neben der VR-CAVE zur Verfügung.

9.3 Fragebögen und Protokolle, Messverfahren kreativer Produkte

In dieser Studie wurden die gleichen Parameter (abhängige Variablen) wie in der Studie 2 erhoben sowie die selben Erhebungsmethoden eingesetzt (Abschnitt 7.3, S. 147). Dazu zählen der selbstentwickelte Fragebogen zum Skizzierprozess, der AttrakDiff-Fragebogen zu hedonistischen und pragmatischen Eigenschaften, die automatisch erhobenen Eigenschaften des Skizzierprozesses und der Skizzen, die Beobachtung der Benutzer und auch die Bewertung der Skizzen durch einen Experten.

Lediglich auf den Fragebögen zum Skizzierprozess wurden Items zur wahrgenommenen Einheitlichkeit der Skizzierwerkzeuge, zur wahrgenommenen Sicherheit im Umgang mit der Skizziertechnik und zur Kontrollierbarkeit hinzugefügt, die auf den entsprechenden Fragen der Studie 3 fußten (Anhang 12.10.2, S. 360).

9.4 Experimentelle Skizzieraufgaben

Ähnlich wie in der Studie 2 wurde den Teilnehmern in allen drei Bedingungen die Aufgabe gestellt, Möbel bzw. Einrichtungsgegenstände zu entwerfen (Anhang 12.10.1, S. 354). Auch für diese Aufgaben wurden ungewöhnliche Aufgabenstellungen gewählt, um einen möglichst gleich hohen Lösungsaufwand zu erzeugen.

Die erste Aufgabe bestand darin, eine Couch samt Tisch in futuristischem Design für das Foyer des Fraunhofer IPK zu entwerfen (vgl. Abbildung 83).

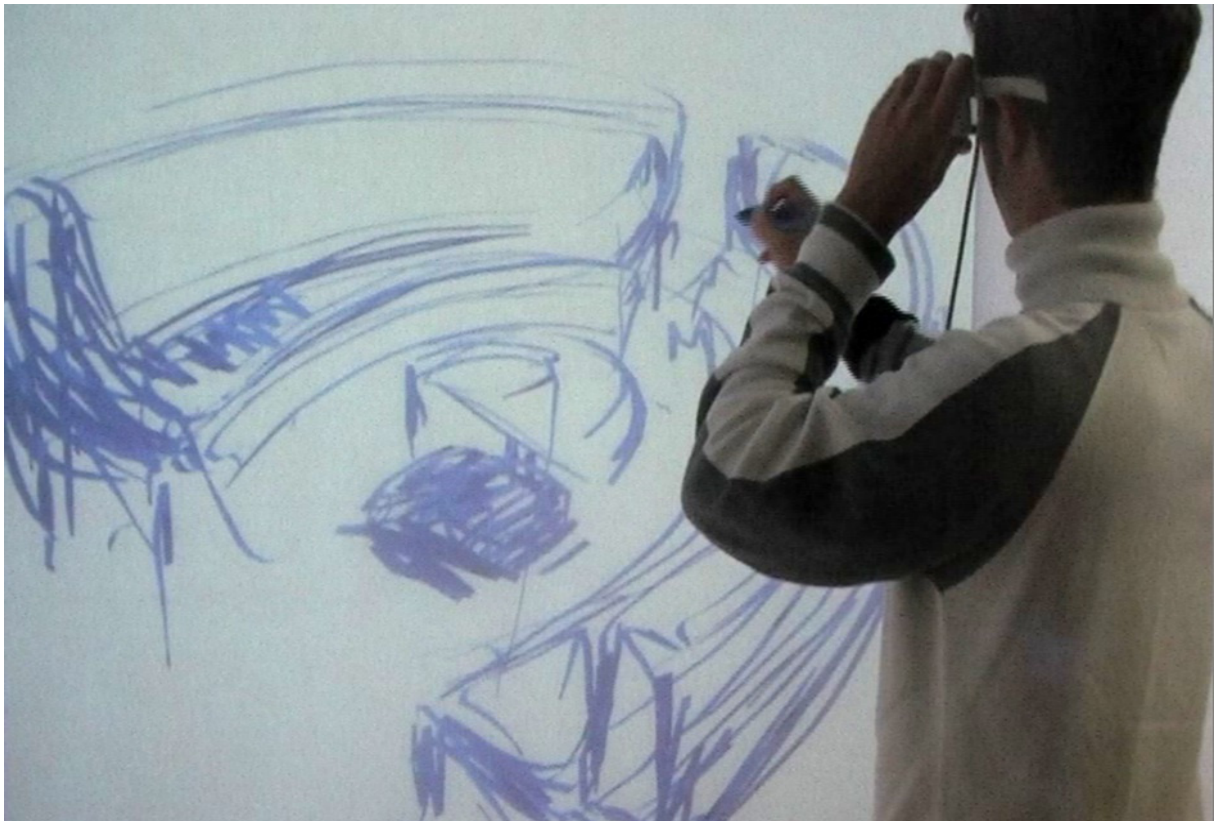


Abbildung 83: Teilnehmer während der ersten Aufgabe (Couch und Tisch, hier: physische Bedingung).

In der zweiten Aufgabe sollten „Schlafkapseln“ für einen sogenannten „Snoozle-Raum“ entworfen werden. In diesen sollten sich die Mitarbeiter des Instituts liegend ausruhen können. Das Ein- und Aussteigen aus den Kapseln sollte möglichst unkompliziert möglich sein (vgl. Abbildung 84).

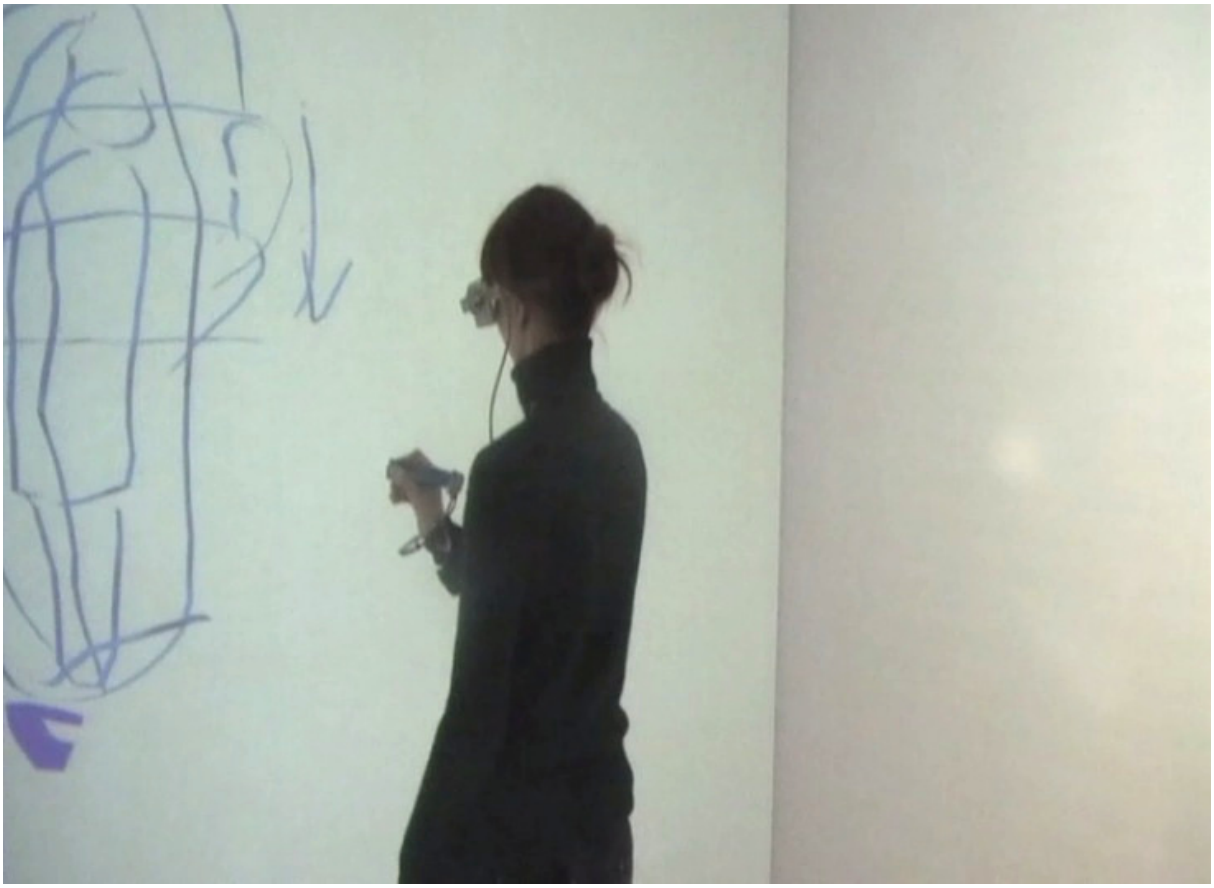


Abbildung 84: Teilnehmerin während der zweiten Aufgabe (Schlafkapsel im Snoozle-Raum; hier: hybride Bedingung; der sichtbare Versatz zwischen Stiftspitze und physischem Stift resultiert aus den unterschiedlichen Positionen der Kamera und der Teilnehmerin).

Die dritte Aufgabe bestand im Entwurf eines höhenverstellbaren Massagestuhls, der für Massagen verwendet werden sollte, die den Mitarbeitern zweimal wöchentlich angebotenen würden (vgl. Abbildung 85). In der Zeit, in der der Stuhl nicht genutzt würde, sollte er einfach zu verstauen sein.



Abbildung 85: Teilnehmer während der dritten Aufgabe (Massagestuhl, hier: virtuelle Bedingung; der sichtbare Versatz zwischen Hand und virtuellem Stift resultiert aus den unterschiedlichen Positionen der Kamera und des Teilnehmers).

Um sich mit den Skizzierwerkzeugen vertraut zu machen, durchliefen die Teilnehmer zu Beginn des Versuchs eine Trainingsphase. Dazu wurden in der VR-CAVE wiederum geometrische Basisobjekte eingeblendet, die abzuzeichnen waren. Die Teilnehmer entschieden selbst, wann sie die Trainingsphase abschließen wollten.

9.5 Teilnehmer, Design und Ablauf des Versuchs

An der Studie nahmen dieselben 36 Personen wie in Studie 2 teil (Abschnitt 7.4, S. 151). Alle Teilnehmer durchliefen die drei Aufgaben in derselben Reihenfolge, jedoch wurde die Reihenfolge der Versuchsbedingungen (physisch P, hybrid H, virtuell V) zufällig variiert. Somit entstanden sechs gleich große Gruppen. Den Teilnehmern der ersten Gruppe (G1) wurde beispielsweise zuerst die Aufgabe 1 in der Bedingung P gestellt, danach hatten sie die Aufgabe 2 in der Bedingung H und anschließend die Aufgabe 3 in der Bedingung V zu lösen. Die Teilnehmer der zweiten Gruppe (G2) mussten zuerst die Aufgabe 1 in der Bedingung H, anschließend Aufgabe 2 in der Bedingung V und die dritte Aufgabe in der Bedingung P lösen usw. (vgl. Tabelle 18). Dieses Versuchsdesign entspricht einem mehrfaktoriellen Versuchsdesign in der Variante eines lateinischen Quadrats. Dessen Anwendung war zulässig, da aufgrund der Formulierung der Aufgaben keine Reihenfolgen- und Interaktionseffekte zwischen den Aufgaben und den Repräsentations-

formen der Skizzierwerkzeuge zu erwarten waren (vgl. Diskussion in Studie 2, Abschnitt 7.5, S. 152). Dennoch wurden mögliche Effekte dieser Art in die Auswertung einbezogen.

Die Versuchsbedingungen sind ausbalanciert, da jede Faktorkombination der Faktoren *Repräsentation* und *Aufgabe* mit der gleichen Anzahl an Versuchsteilnehmern besetzt ist.

Tabelle 18: 3x3 faktorieller Versuchsplan der Studie 4.

	Physische Interaktionstechnik P	*Hybride Interaktionstechnik H*	*Virtuelle Interaktionstechnik V*
Aufgabe I	Gruppe 1 (PHV), Gruppe 4 (PVH)	Gruppe 2 (HVP), Gruppe 5 (HPV)	Gruppe 3 (VPH), Gruppe 6 (VHP)
Aufgabe II	Gruppe 3 (VPH), Gruppe 5 (HPV)	Gruppe 1 (PHV), Gruppe 6 (VHP)	Gruppe 2 (HVP), Gruppe 4 (PVH)
Aufgabe III	Gruppe 2 (HVP), Gruppe 6 (VHP)	Gruppe 3 (VPH), Gruppe 4 (PVH)	Gruppe 1 (PHV), Gruppe 5 (HPV)

9.6 Auswertungsmethode

Zur Auswertung der Ergebnisse wurden wie in Studie 2 Gemischte Lineare Modelle herangezogen, da diese robust gegenüber Einflüssen durch Interaktionen der Faktoren, Reihenfolgeneffekte und Zufallseffekte sind. Die Teilnehmer wurden wiederum aufgrund ihres variierenden spezifischen Vorwissens und ihrer Fähigkeiten als Zufallsfaktoren behandelt, dazu wurde die Gruppenzugehörigkeit in Form einer „Dummycodierung“ (Bortz, 2005, S. 484ff) in das Modell eingebracht. Die Faktoren Repräsentationsform der Werkzeuge (REP: physisch P, hybrid H, virtuell V), Aufgabe (Aufgabe I, Aufgabe II, Aufgabe III) und die Interaktion der Faktoren „Repräsentation“ und „Aufgabe“ dienten als feste Faktoren des Modells (engl. *fixed factor*; vgl. Tabelle 19). Die Auswertung wurde mit dem Programm SPSS Version 17.0 vorgenommen.

Tabelle 19: Faktoren des Gemischten Linearen Modells zur Auswertung der Studie 4.

Feste Effekte	Aufgabe
	Repräsentation der Skizzierwerkzeuge
	Aufgabe x Freiheitsgrad
Zufallseffekte	Gruppenzugehörigkeit der Versuchsteilnehmer

Ordinal skalierte Merkmale wurden mit dem Friedman-Test (Anhang 12.6.1, S. 291) ausgewertet, welcher die Rangreihenfolgen von gepaarten Stichproben mit mehr als zwei Stichproben ermittelt. Dieser nonparametrische Test ist robust gegenüber nicht normalverteilten Daten, welche in der Mehrzahl der Stichproben gegeben waren.

Zur Auswertung der Fragebögen und inhaltsanalytischen Quantifizierung der enthaltenen Aussagen wurde dasselbe Kategorienschema wie in Studie 2 angewendet (Abschnitt 7.7, S. 156, und Anhang 12.8.4, S. 329). Die Häufigkeiten der Nennungen je Kategorie wurden mit dem Cochran-Q-Test untersucht, der im Unterschied zum McNemar-χ^2-Tests auch für Untersuchungen von mehr als zwei Wiederholungen geeignet ist (Anhang 12.6.1, S. 291). Die Auswertung der aggregierten Häufigkeiten erfolgte wiederum mit dem Friedman-Test.

9.7 Ergebnisse – Prozesseigenschaften (Skizzieren)

9.7.1 Benutzerverhalten: Skizzierdauer, Stiftgebrauch und Benutzergeschwindigkeit

Dauer der aktiven Skizzierhandlungen: Die Zeit, in der die Teilnehmer aktiv skizzierten (d. h. mit dem Stift zeichneten), variierte zwischen den Bedingungen um 18 Prozent (M_P=3,21 min, SD_P=1,64; M_H=3,79 min, SD_H=2,49; M_V=3,53 min, SD_V=2,55). Die Auswertung des GLM ergab, dass die Unterschiede zwischen den Bedingungen nicht signifikant sind (F_{REP}(2, 34,61)=0,667, p_{REP}=0,52). Es wurden auch keine signifikante Einflüsse des Zufallsfaktors, der Aufgabe sowie der Interaktion zwischen Aufgabe und Repräsentation gefunden.

Auch für die *Gesamtdauer des Skizzierprozesses* wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen den Bedingungen gefunden (M_P=7,37 min, SD_P=4,09; M_H=9,07 min, SD_H=4,86; M_V=9,65 min, SD_V=5,88; F_{REP}(2, 36,345)=1,731, p_{REP}=0,191). Signifikante Einflüsse weiterer Faktoren wurden ebenfalls nicht gefunden (vgl. Signifikanzniveau, Abschnitt 7.7, S. 156).

▷ Für die Zeit, die für das Skizzieren der Lösung aufgewendet wurde, konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Bedingungen gefunden werden.

Verhältnis Gesamtdauer/aktive Skizzierdauer: Der nachträglich ermittelte Quotient aus Gesamtdauer und Skizzierdauer war in der virtuellen Bedingung am höchsten und in der physischen am geringsten (M_P=2,40, SD_P=0,83; M_H=2,63, SD_H=0,99; M_V=2,95, SD_V=0,64; vgl. Abbildung 86). Die Auswertung des GLM ergab, dass dieser Unterschied auf die Repräsentation der Werkzeuge zurückgeführt werden kann (F_{REP}(2, 37,076)=13,466, p_{REP}<0,001, η^2_{REP}=0,3744). Im paarweisen Vergleich wird dieser Unterschied jedoch nur zwischen der virtueller Bedingung auf der einen Seite und der hybriden und physischen Bedingung auf der anderen Seite signifikant ($p_{V\text{-}P}$<0,001, $p_{H\text{-}V}$=0,006, $p_{H\text{-}P}$=0,194). Es wurden keine signifikanten Einflüsse der Aufgabe sowie der Interaktion zwischen Aufgabe und Repräsentation gefunden (F_{AUF}(2, 28,55)=1,373, p_{AUF}=0,270, η^2_{AUF}=0,075; $F_{REP\times AUF}$(4, 43,77)=1,291, $p_{REP\times AUF}$=0,288, $\eta^2_{REP\times AUF}$=0,106). Der Einfluss des Zufallsfaktors wurde signifikant (*Wald Z*=2,788, p=0,005). Da die Effektstärke des Einflusses der Repräsentation bei 37 Prozent liegt, kann der Effekt auf die Repräsentation zurückgeführt werden.

▷ Die Verhältnisse aus Gesamtdauer und Skizzierdauer (Reflektionszeit und Externalisierungszeit) ist in der virtuellen Bedingung am höchsten, d. h. in dieser Bedingung wurde vergleichsweise länger betrachtet als skizziert.

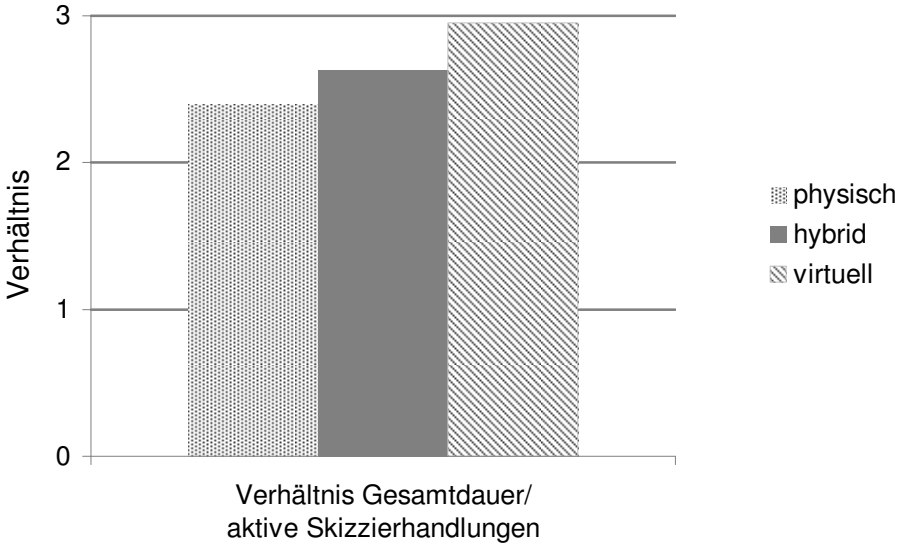


Abbildung 86: Verhältnis Gesamtdauer/aktive Skizzierdauer.

Geschwindigkeit der Benutzerbewegungen: Die Geschwindigkeit, mit der sich die Teilnehmer in der CAVE bewegten, war in allen Bedingungen ungefähr gleich hoch (M_P=0,08 m/s, SD_P=0,04; M_H=0,07 m/s, SD_H=0,05; M_V=0,07 m/s, SD_V=0,02). Die Auswertung des GLM ergab, dass weder die Repräsentation noch die Aufgabe einen signifikanten Einfluss auf die Geschwindigkeit ausüben ($F_{REP}(2, 39{,}507)=2{,}242$, $p_{REP}=0{,}12$, $\eta^2_{REP}=0{,}0717$; $F_{AUF}(2, 38{,}05)=1{,}109$, $p_{AUF}=0{,}34$, $\eta^2_{AUF}=0{,}0392$). Die Interaktion zwischen Aufgabe und Repräsentation entwickelte jedoch einen signifikanten Einfluss ($F_{REPxAUF}(4, 60{,}06)=4{,}064$, $p_{REPxAUF}=0{,}006$, $\eta^2_{REPxAUF}=0{,}213$). Der Einfluss des Zufallsfaktors wurde ebenfalls signifikant (*Wald* Z=5,378, p<0,001). Aufgrund dieser Einflüsse muss von einem Einfluss der zufälligen Verteilung der Teilnehmer auf die Versuchsgruppen ausgegangen werden (vgl. lateinisches Quadrat, Abschnitt 7.6, S. 155). Ein Effekt der Repräsentation kann jedoch aufgrund dieser Ergebnisse nicht angenommen werden, da die Irrtumswahrscheinlichkeit über dem Signifikanzniveau blieb (Abschnitt 7.7, S. 156).

9.7.2 Einschätzung des Skizzierprozesses durch die Benutzer

Die Einschätzung des Skizzierprozesses, die an Hand des Fragebogens erfolgte, wurde mittels des Friedman-Tests (Anhang 12.6.1, S. 291) ausgewertet und ergab signifikante Unterschiede in einer Reihe von Faktoren:

In der Schlüsselfunktion *Externalisieren* ergaben sich signifikante Unterschiede zwischen der virtuellen und hybriden Bedingung auf der einen, und der physischen auf der anderen Seite. Der Unterschied zwischen der hybriden und virtuellen Bedingung war dagegen nicht signifikant

(*Median*$_P$=2,00, *IQR*$_P$=2,00–3,00; *Median*$_H$=3,00, *IQR*$_{Hs}$=3,00–4,00; *Median*$_V$=3,50, *IQR*$_V$=3,00–4,00; $\chi^2(2)=12{,}215$, $p=0{,}002$; Abbildung 87). Die Unterstützungsmöglichkeiten des *Reflektierens* („Selbstkommunikation"), wurden von den Teilnehmern dagegen nicht unterschiedlich beurteilt (*Median*$_P$=3,50, *IQR*$_P$=2,25–4,00; *Median*$_H$=3,50, *IQR*$_H$=3,00–4,00; *Median*$_V$=3,00, *IQR*$_V$=3,00–4,00; $\chi^2(2)=0{,}56$, $p=0{,}755$; Abbildung 87).

- ▷ Die Teilnehmer schätzten ihre Möglichkeiten zur Externalisierung in der virtuellen und hybriden Bedingung höher ein als in der physischen Bedingung.
- ▷ Die Möglichkeiten zur Selbstkommunikation wurden in allen Bedingungen annähernd gleich eingeschätzt.

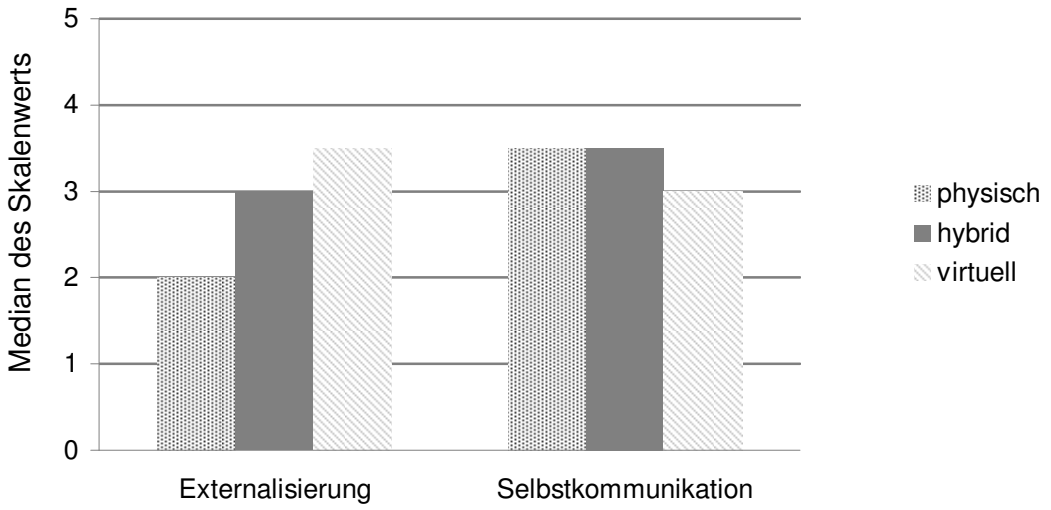


Abbildung 87: Medianwerte der Externalisierungs- und Selbstkommunikationsunterstützung in den drei Bedingungen.

In den Dimensionen zur *Flüssigkeit* und *Geschwindigkeit* des Skizzierprozesses konnten keine Unterschiede zwischen den Bedingungen ermittelt werden.

Die *Verfügbarkeit der Skizziertechniken* wurde von den Teilnehmern in der virtuellen und hybriden Bedingung etwas höher eingeschätzt als in der physischen Bedingung (*Median*$_P$=3,00, *IQR*$_P$=2,00–3,00; *Median*$_H$=3,00, *IQR*$_H$=2,00–4,00; *Median*$_V$=3,00, *IQR*$_V$=2,25–4,00). Diese Unterschiede wurden jedoch nur tendenziell signifikant[1] ($\chi^2(2)=4{,}926$, $p=0{,}085$) und zeigten sich nur zwischen der virtuellen und der physischen Bedingung ($p_{V\text{-}P}=0{,}071$, $p_{H\text{-}V}=0{,}109$, $p_{H\text{-}P}=0{,}480$). In allen weiteren Items, die sich auf die von Buxton abgeleiteten Kriterien des Skizzierens bezogen

[1] Vgl. tendenzielles Signifikanzniveau in Abschnitt 7.7 (S. 155).

(vgl. Tabelle 1, Abschnitt 2.1.2, S. 19), konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Bedingungen ermittelt werden.

9.7.3 Wahrgenommene Einheit der Werkzeuge, Kontrollierbarkeit und Beanspruchung

Die Auswertung der Antworten zur wahrgenommen Einheit der Skizzierwerkzeuge erfolgte wiederum mittels eines Friedman-Tests und ergab signifikante Unterschiede zwischen den drei Bedingungen. Das virtuelle und das hybride Werkzeug wurden als am stärksten einheitlich eingeschätzt, die Einheitlichkeit des physischen Werkzeugs dagegen geringer ($Median_P$=2,00, IQR_P=2,00–3,00; $Median_H$=3,00, IQR_H=2,00–4,00; $Median_V$=3,00, IQR_V=2,00–4,00; $\chi^2(2)=7{,}855$; $p=0{,}020$, Abbildung 88) Die Unterschiede werden in einem Paarvergleich jedoch nur zwischen der hybriden und virtuellen Bedingung auf der einen und der physischen Bedingung auf der anderen Seite sichtbar ($p_{V\text{-}P}=0{,}020$, $p_{H\text{-}V}=1{,}000$, $p_{H\text{-}P}=0{,}012$).

> ▷ Die wahrgenommene Einheit der Skizzierwerkzeuge war in den virtuellen und hybriden Bedingungen am höchsten.

Weiterhin ergaben sich signifikante Effekte auf die Fragen, ob sich die Teilnehmer *sicher* im Umgang mit der Skizziertechnik gefühlt hätten ($Median_P$=2,00, IQR_P=2,00–3,00; $Median_H$=4,00, IQR_H=2,25–4,00; $Median_V$=3,00, IQR_V=2,00–4,00; $\chi^2(2)=18{,}633$; $p<0{,}001$). Die Fragen zur *Kontrollierbarkeit* der virtuellen Umgebung mittels der Skizzierwerkzeuge ergaben tendenziell signifikante Unterschiede zwischen den Bedingungen ($Median_P$=3,00, IQR_P=2,00–3,00; $Median_H$=3,50, IQR_H=2,00–4,00; $Median_V$=3,00, IQR_V=2,00–4,00; $\chi^2(2)=5{,}797$; $p=0{,}055$). In beiden Faktoren wurde jeweils die hybride Bedingung als am besten geeignet eingeschätzt, gefolgt von der virtuellen und der physischen Bedingung.

> ▷ Das hybride Skizzierwerkzeug erlaubte den Teilnehmern nach eigener Einschätzung den sichersten Umgang und die beste Kontrolle der virtuellen Umgebung.

Anhand der Antworten bezüglich der *geistigen* ($\chi^2(2)=1{,}027$; $p=0{,}598$) und *körperlichen Beanspruchung* ($\chi^2(2)=2{,}649$; $p=0{,}266$) konnten keine Unterschiede gefunden werden.

> ▷ Zur körperlichen und geistigen Beanspruchung durch die Skizziertechnik konnten jeweils keine Unterschiede zwischen den Bedingungen gefunden werden.

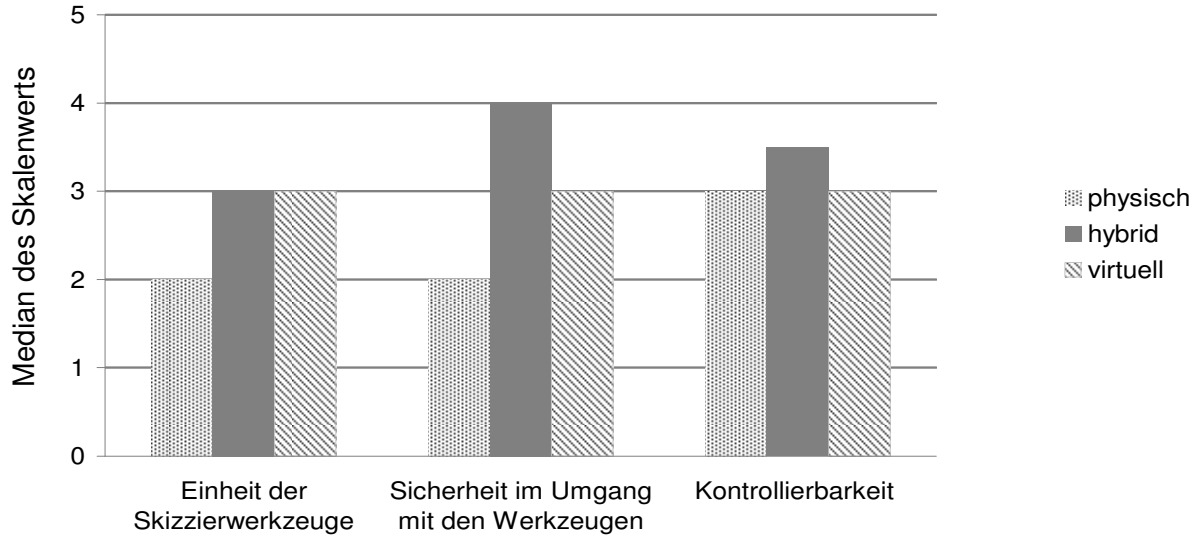


Abbildung 88: Bewertung der Externalisierungs- und Selbstkommunikationsunterstützung.

9.7.4 Einschätzung der pragmatischen und hedonistischen Qualitäten durch die Benutzer

Die Auswertung der Ergebnisse des AttrakDiff-Fragebogens erfolgte aufgrund dessen metrischen Datenniveaus wiederum mittels Gemischter Linearer Modelle (GLM).

Für die hedonistische Qualität *Identifikation* (HQ-I) wurden in der hybriden Bedingung die höchsten Werte ermittelt, gefolgt von der virtuellen und der physischen Bedingung (M_P=3,81, SD_P=0,89; M_H=4,70, SD_H=0,89; M_V=4,32, SD_V=0,99; Abbildung 89). Im Paarvergleich erreicht nur der Unterschied zwischen der hybriden und der physischen Bedingung ein signifikantes Niveau ($p_{V\text{-}P}$=0,114, $p_{H\text{-}V}$=0,098, $p_{H\text{-}P}$<0,001). Die Auswertung des GLM ergab, dass der Effekt auf den Faktor der Repräsentation des Stiftes zurück geht (F_{REP}(2, 36,935)=9,632, p_{REP}<0,001, η^2_{REP}=0,2909). Es wurden keine signifikanten Einflüsse der Aufgabe sowie der Interaktion zwischen Aufgabe und Repräsentation gefunden (F_{AUF}(2, 30,591)=1,175, p_{AUF}=0,322, η^2_{AUF}=0,0578; $F_{REPxAUF}$(4, 53,018)=1,924, $p_{REPxAUF}$=0,120, $\eta^2_{REPxAUF}$=0,1268). Der Einfluss des Zufallsfaktors wurde signifikant (*Wald Z*=3,255, p=0,001). Da die Effektstärke des Einflusses der Repräsentation bei 29 Prozent liegt, kann ein Effekt der Repräsentation auf die Dimension HQ-I angenommen werden.

In der hedonistischen Qualität *Stimulation* (HQ-S) wurden die hybride und die virtuelle Bedingung gleich hoch bewertet, die physische Bedingung erhielt die niedrigsten Werte (M_P=4,71, SD_P=1,07; M_H=5,46, SD_H=0,94; M_V=5,44, SD_V=0,86; Abbildung 89). Die Auswertung des GLM ergab, dass diese Effekte auf den Faktor der Repräsentation der Werkzeuge zurück gehen (F_{REP}(2, 37,363)=7,187, p_{REP}=0,002, η^2_{REP}=0,2568). Im Paarvergleich kann kein Unterschied zwischen der hybriden und der virtuellen Bedingung gefunden werden ($p_{V\text{-}P}$=0,009, $p_{H\text{-}V}$=1,000, $p_{H\text{-}P}$=0,005). Weder die Aufgabe noch eine Interaktion zwischen beiden Faktoren hatten einen signifikanten Einfluss (F_{AUF}(2, 28,420)=0,042, p_{AUF}=0,959, η^2_{AUF}=0,0026; $F_{REPxAUF}$(4,

53,151)=1,038, $p_{REPxAUF}$=0,396, $\eta^2_{REPxAUF}$=0,0725). Der Einfluss des Zufallsfaktors wurde signifikant (*Wald Z*=2,727, p=0,006). Ein Effekt der Repräsentation auf die Dimension HQ-S kann angenommen werden.

Auch in der *Pragmatischen Qualität* (PQ) wird die hybride Bedingung bevorzugt (M_P=3,19, SD_P=0,92; M_H=4,23, SD_H=0,96; M_V=3,87, SD_V=0,93; Abbildung 89). Der Einfluss der Repräsentation ist signifikant (F_{REP}(2, 35,244)=10,584, p_{REP}<0,001, η^2_{REP}=0,3327), dagegen kann auch hier kein Einfluss der Aufgabe oder einer Interaktion der Faktoren gefunden werden (F_{AUF}(2, 32,097)=1,746, p_{AUF}=0,191, η^2_{AUF}=0,0888; $F_{REPxAUF}$(4, 55,614)=0,931, $p_{REPxAUF}$=0,453, $\eta^2_{REPxAUF}$=0,0627). Im Paarvergleich kann wiederum kein Unterschied zwischen der hybriden und der virtuellen Bedingung gefunden werden (p_{V-P}=0,035, p_{H-V}=0,194, p_{H-P}<0,001). Der Einfluss des Zufallsfaktors wurde dagegen signifikant (*Wald Z*=3,839, p=<0,001). Die Stiftrepräsentation hat demnach mit einem Anteil von 33 Prozent einen Einfluss auf die wahrgenommene pragmatische Qualität.

Schließlich wurde auch die *Gesamtattraktivität* des Systems (ATTR) in der hybriden Bedingung am höchsten eingeschätzt (M_P=4,07, SD_P=1,07; M_H=5,08, SD_H=1,04; M_V=4,56, SD_V=1,10; Abbildung 89), wozu der Faktor der Werkzeugrepräsentation signifikant beitrug (F_{REP}(2, 37,898)=6,936, p_{REP}=0,003, η^2_{REP}=0,2289). Im Paarvergleich ergibt sich, dass diese Unterschiede lediglich zwischen der physischen und der hybriden Bedingung signifikant werden (p_{V-P}=0,383, p_{H-V}=0,117, p_{H-P}<0,002). Wiederum hatten weder die Aufgabe noch eine Interaktion der Faktoren einen signifikanten Einfluss (F_{AUF}(2, 33,233)=1,365, p_{AUF}=0,269, η^2_{AUF}=0,0648; $F_{REPxAUF}$(4, 55,185)=1,528, $p_{REPxAUF}$=0,207, $\eta^2_{REPxAUF}$=0,0997). Der Einfluss des Zufallsfaktors wurde erneut signifikant (*Wald Z*=3,693, p<0,001). Aufgrund der höheren Effektstärke kann ein Einflusses der Repräsentation der Skizzierwerkzeuge auf die wahrgenommen Attraktivität angenommen werden.

Da in allen vier Dimensionen des AttrakDiff-Fragebogens Zufallseffekte aus der Gruppenzugehörigkeit der Teilnehmer ermittelt wurden und die Effektstärken des Einflusses der Stiftrepräsentation im Bereich von 22 bis 33 Prozent liegen, muss bei der Beurteilung der Ergebnisse berücksichtigt werden, dass interindividuelle Unterschiede einen wesentlichen Einfluss auf die Einschätzung der vier Dimensionen besitzen.

▷ Die Einschätzungen der hedonistischen und pragmatischen Qualitäten der Skizzierwerkzeuge waren in der hybriden Bedingung durchgängig am höchsten. Der Unterschied zwischen der hybriden und der virtuellen Bedingung wurde jedoch nicht signifikant (tendenzielle Signifikanz in den Dimensionen Identifikation und Attraktivität).

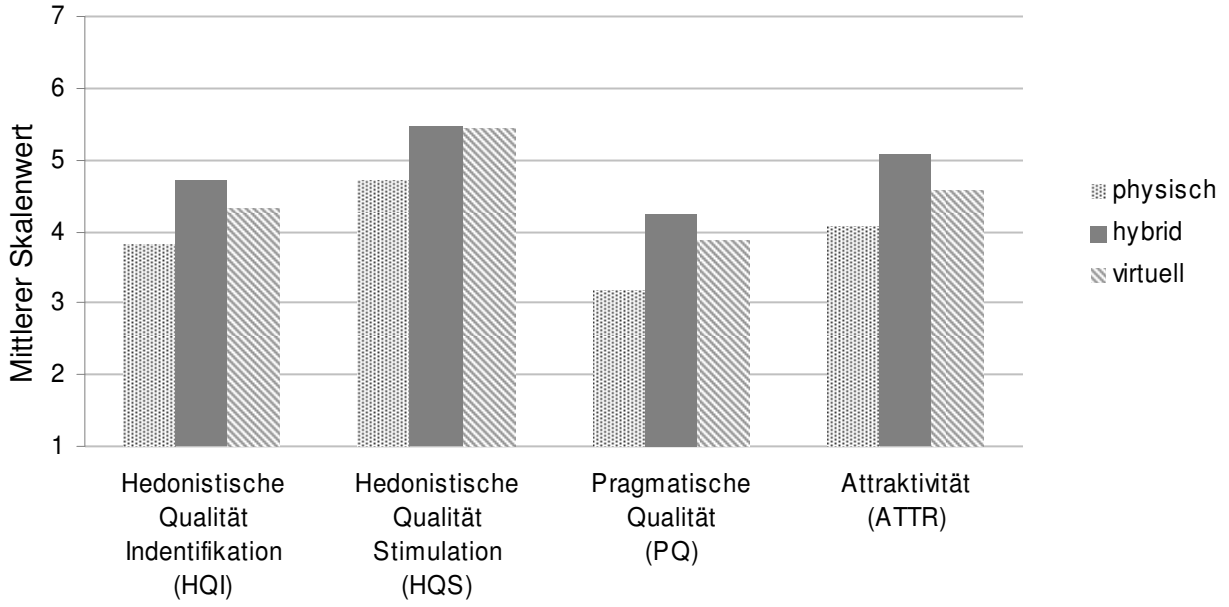


Abbildung 89: Mittelwerte der AttrakDiff Dimensionen.

9.7.5 Qualitative Auswertung der Benutzeräußerungen

Die Antworten auf die offenen Fragen des Fragebogens über die subjektiv wahrgenommenen Vorteile und Nachteile der Skizziertechniken wurden wiederum inhaltsanalytisch ausgewertet. Zur Auswertung wurde dasselbe Kategorienschema wie in Studie 2 eingesetzt (Abschnitt 7.7, S. 156, Anhang 12.8.4, S. 329). Tabelle 20 gibt die Hauptkategorien samt beispielhaften Benutzeräußerungen wieder, und nennt die Gesamtzahl der positiven und negativen Nennungen je Kategorie. Abbildung 90 zeigt die Anzahl der Benutzeräußerungen, verteilt auf die sechs Kategorien. Die detaillierten Darstellungen der Ergebnisse je Subkategorie befinden sich im Anhang 12.10.3 (S. 360).

Insgesamt wurden 36 negative Benutzeräußerungen in der physischen, 36 in der hybriden und 37 in der virtuellen Bedingung ermittelt. Die Auszählung der positiven Benutzeräußerungen ergab 18 Benutzeräußerungen in der physischen Bedingung, 39 in der hybriden und 29 in der virtuellen Bedingung, diese Unterschiede wurden statistisch tendenziell signifikant ($\chi^2(2)=4{,}750$; $p<0{,}093$).

▷ Die meisten positiven Teilnehmeräußerungen entfielen auf die hybride Bedingung.

Signifikante Unterschiede zwischen den Häufigkeiten der Benutzeräußerungen in beiden Bedingungen sind in Tabelle 21 zusammengefasst. Über diese hinaus konnten keine statistisch signifikanten Effekte ermittelt werden.

Ebenso wie in Studie 2 ergab die qualitative Auswertung auch in dieser Studie, dass die häufigsten negativen Benutzeräußerungen in Zusammenhang mit der *sensumotorischen Steuerung* stehen (23 negative Nennung in der physischen, 22 in der hybriden und 24 in der virtuellen Bedingung). Die Teilnehmer benannten insbesondere die Schwierigkeit, Verbindungs- und Endpunkte der Linien

zu finden. Dieses Problem wurde besonders häufig in der physischen Bedingung angesprochen, der Unterschied zwischen den Bedingungen wurde statistisch signifikant (zehn Nennungen in der physischen, zwei in der hybriden und vier in der virtuellen Bedingung, $Q(2)=6{,}50$; $p=0{,}039$; Tabelle 21). In die Hauptkategorie sensumotorische Steuerung fielen insgesamt fünf positive Äußerungen in der hybriden, drei in der virtuellen und keine in der physischen Bedingung; dieser Effekt wurde ebenfalls statistisch signifikant ($\chi^2(2)=6{,}33$; $p=0{,}042$; Tabelle 21).

- ▷ Die Teilnehmer bemängelten Probleme des Wiederfindens von Punkten im Raum, insbesondere in der physischen Bedingung.
- ▷ Die sensumotorische Steuerung der Skizzierwerkzeuge wurde in der hybriden und in der virtuellen Bedingung teilweise auch positiv bewertet, die negativen Äußerungen überwogen jedoch.

In die Kategorie *Ergonomie* fielen Äußerungen, die die Kabel, welche an allen Skizzierwerkzeugen angebracht waren, als störend beschrieben (zwei Nennungen ausschließlich in der hybriden Bedingung). Darüber hinaus wurde die Handhabung und Lage der Skizzierwerkzeuge in der Hand bemängelt (vier Nennungen in der physischen, eine in der hybriden und vier in der virtuellen Bedingung).

Die *methodische Unterstützung* durch die Skizziertechniken wurde von den Teilnehmern nur relativ selten angesprochen. Hier erhielt die physische Bedingung zwei positive Nennungen, die hybride fünf positive und eine negative Nennung und die virtuelle drei positive Nennungen.

Auch fehlende oder wünschenswerte *Funktionen* wurden vergleichsweise selten benannt. Die am häufigsten gewünschten Funktionen waren eine Funktion zum Kopieren von Skizzeninhalten („Copy&Paste“, drei Nennungen), zum Einblenden von Grundkörpern (beispielsweise Würfeln, Kugeln etc., drei Nennungen), eine Spiegelfunktion (zwei Nennungen) und ein dreidimensionales Raster zur Orientierung im Raum (zwei Nennungen).

Wie in Studie 2 wurde der *Skizzierprozess* von den Teilnehmern überwiegend positiv eingeschätzt, wobei die hybride Bedingung die meisten positiven Nennungen erhielt (13 Nennungen in der physischen, 21 in der hybriden und 14 in der virtuellen Bedingung; tendenziell signifikant, $\chi^2(2)=5{,}03$; $p=0{,}081$; Tabelle 21). Darunter wurden insbesondere genannt: die Anregung des räumlichen Denkens (jeweils fünf positive Nennungen), die Darstellung der Objekte im Maßstab eins-zu-eins (zwei Nennungen in der physischen, fünf in der hybriden, drei in der virtuellen Bedingung) sowie die Möglichkeit, Skizzen von Innen betrachten zu können (eine Nennung in der physischen, drei in der hybriden und keine in der virtuellen Bedingung; statistisch tendenziell signifikant, $Q(2)=4{,}66$; $p=0{,}097$; Tabelle 21).

- ▷ Die Teilnehmer äußerten sich am häufigsten in der hybriden Bedingung positiv zum Skizzierprozess. Dieser Effekt wurde statistisch tendenziell signifikant.

Tabelle 20: Inhaltliche Kategorien der Benutzeräußerungen und deren Häufigkeiten.

Kategorie	***Beschreibung***	***Beispiel***	***Summen der Benutzeräußerungen***		
			Physische Bedingung	***Hybride Bedingung***	***Virtuelle Bedingung***
Sensumotorische Steuerung des Skizzierprozesses	Wiederfinden von Verbindungspunkten im 3D-Raum; Reaktionszeit; Verzögerung; Occlusion; Präzision; Skizzieren von Linien; Skizzieren auf mehreren Ebenen, Skizzieren in die Tiefe etc.	„Problematisch war, dass die virtuelle Linie nicht zur Stiftspitze passte. Nur durch das Zeichnen wusste ich, wo ich war.“ (Äußerung zur physischen Bedingung)	0 positive Äußerungen 23 negative Äußerungen	5 positive Äußerungen 22 negative Äußerungen	3 positive Äußerungen 24 negative Äußerungen
Ergonomie	Handhabung der Skizzierwerkzeuge, haptisches Feedback	„Der hybride Stift ist leicht zu handhaben, da man Linien gut setzen kann“	2 positive Äußerungen 5 negative Äußerungen	3 positive Äußerungen 5 negative Äußerungen	2 positive Äußerungen 7 negative Äußerungen
Methodische Unterstützung	Ideenerzeugung, Lösungsfindung, Kommunikationswerkzeug, Analysehilfe, Assoziationsbildung etc.	„Es entstehen neue Ideen, bzw. man experimentiert mit Formen aus Bewegungen.“ (Äußerung zur physischen Bedingung)	2 positive Äußerungen 0 negative Äußerungen	5 positive Äußerungen 1 negative Äußerung	3 positive Äußerungen 0 negative Äußerungen
Funktionen	Fehlende (bzw. gewünschte) Funktionen wie Löschen, Skalieren (Zoomen), Integration in CAD-Werkzeuge	„Ich hätte die Skizzen gerne mit Schatten usw. ausgearbeitet.“ (Äußerung zur hybriden Bedingung)	1 positive Äußerung (bzw. Wunsch) 2 negative Äußerungen (bzw. empfundene Mängel)	4 positive Äußerungen (bzw. Wünsche) 2 negative Äußerungen (bzw. empfundene Mängel)	7 positive Äußerungen (bzw. Wünsche) 0 negative Äußerungen (bzw. empfundene Mängel)
Vergleich zum herkömmlichen Skizzieren	Skizzieren auf Papier im Vergleich zur Skiziertechnik	„Man merkt schnell, ob Dinge tatsächlich möglich sind. Bei 2D-Zeichnungen auf Papier sieht man oft den Selbstbetrug nicht.“ (Äußerung zur hybriden Bedingung)	0 positive Äußerungen 0 negative Äußerungen	1 positive Äußerung 0 negative Äußerungen	0 positive Äußerungen 0 negative Äußerungen

Tabelle 20 (fortgesetzt): Inhaltliche Kategorien der Benutzeräußerungen und deren Häufigkeiten.

Skizzierprozess	Kognitive Unterstützung (Aufmerksamkeit, Erlernbarkeit, Umgewöhnung); Physische Aspekte (körperliche Beanspruchung; Einbeziehung des Körpers; das Gefühl, direkt am Modell zu arbeiten); Reflektionsprozess (Maßstäblichkeit, Räumlichkeit, Inspiration, Umsetzungsgeschwindigkeit); Inspiration (Phantasie, Neugier, Spaß etc.)	„Größenverhältnisse einschätzen im Raum bei mehreren Modellen übereinander“ (Äußerung zur virtuellen Bedingung) „direktes Lagegefühl bei der Massageliege“ (Äußerung zur physischen Bedingung)	13 positive Äußerung 6 negative Äußerungen	21 positive Äußerungen 6 negative Äußerungen	14 positive Äußerungen 6 negative Äußerungen

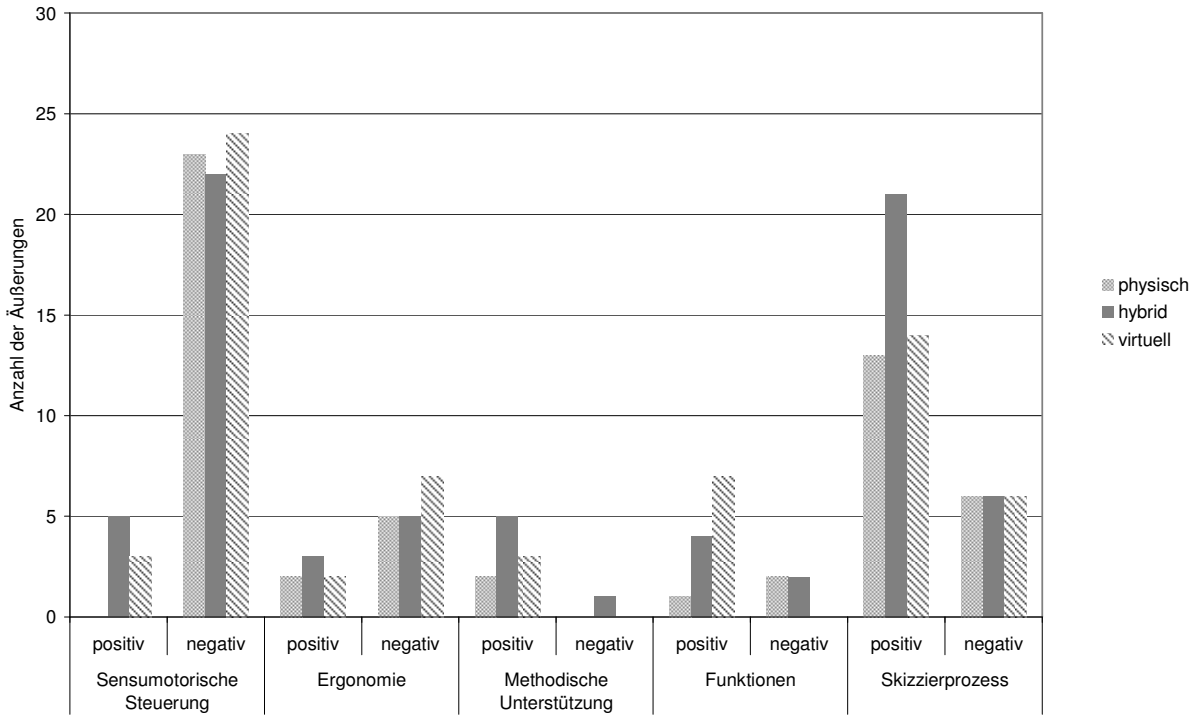


Abbildung 90: Anzahl der Benutzeräußerungen nach Kategorien.

Tabelle 21: Kategorien der Benutzeräußerungen mit signifikanten (*) und tendenziell signifikanten Effekten (in Klammern) zwischen den Bedingungen.

Kategorie	Positive Äußerungen			Negative Äußerungen			χ^2	Q	$p <$
	Physische Bedingung	Hybride Bedingung	Virtuelle Bedingung	Physische Bedingung	Hybride Bedingung	Virtuelle Bedingung			
Hauptkategorie Skizzierprozess	13	21	14				5,03		(0,10)
Skizzen von Innen betrachten („Innenansicht"; zur Hauptkategorie Skizzierprozess)	1	3	0					4,67	(0,10)
Hauptkategorie Sensumotorische Steuerung	0	5	3				6,33		0,05*
Schwierigkeiten, beim Skizzieren Verbindungspunkte im Raum zu finden (zur Hauptkategorie Sensumotorische Steuerung)				9	2	4		6,50	0,05*
Keine Schwierigkeiten, beim Skizzieren Punkte im Raum zu treffen (zur Hauptkategorie Sensumotorische Steuerung)	0	3	2					4,67	(0,10)

9.8 Ergebnisse – Skizzeneigenschaften

9.8.1 Visuelle und lösungsbezogene Eigenschaften der Skizzen

Das Aussehen der Skizzen variierte wie in Studie 2 stark; Abbildung 83 und Abbildung 84 sowie Abbildung 91 bis Abbildung 96 geben einige Beispiele wieder.

Die nachträgliche Beurteilung der Skizzen, ob eine *Entwicklung der Lösungsidee* in den zu einer Aufgabe gehörigen Skizzen erkennbar ist, führte zu signifikanten Unterschieden zwischen den Bedingungen. In der hybriden Bedingung traf das auf 14 Lösungsideen zu, in der physischen auf 11 und in der virtuellen Bedingung auf sechs Lösungsideen (Cochran-Q-Test: f_P=11, f_H=14, f_V=6; $\chi^2(2)$=7,54; p=0,023; Anhang 12.6.1, S. 291).

Darüber hinaus konnten in keinem weiteren auf die visuellen Eigenschaften der Skizze bezogenen Faktor statistisch signifikante Effekte gefunden werden (*Perspektive*, *Proportionalität*). Dies gilt auch für die lösungsbezogenen Eigenschaften wie die *Anzahl der Lösungsvarianten* je Aufgabe, die in der Expertenbewertung bestimmten Faktoren *Kreativität*, *Ästhetik, Skizzenhaftigkeit* und *Mehrdeutigkeit,* und die nach Pache (2005) ermittelten *Abstraktionsniveaus* der Skizzen (vgl. Tabelle 22, Tabelle 23 und Tabelle 24).

▷ In Bezug auf die visuellen Eigenschaften der Skizzen konnten keine wesentlichen Unterschiede zwischen den Bedingungen ermittelt werden.

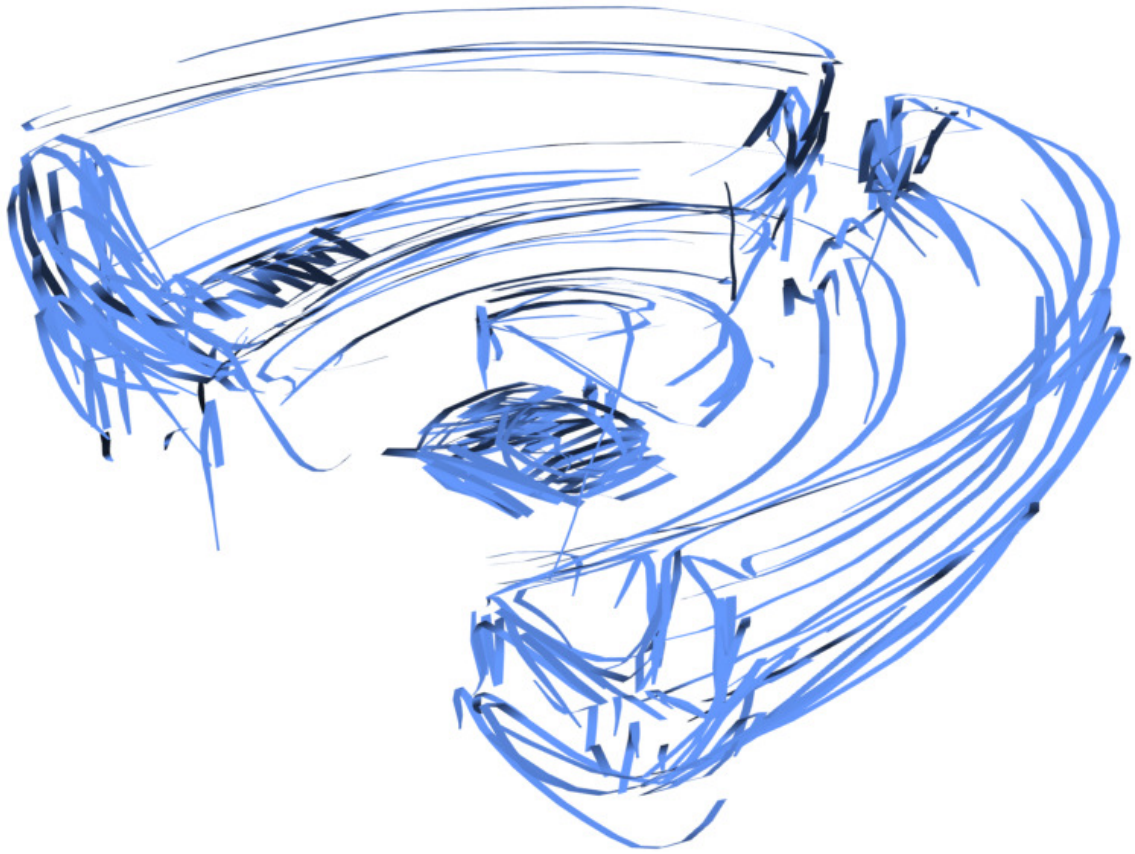


Abbildung 91: Skizze einer Couch mit Tisch (Aufgabe 1), erstellt in der physischen Bedingung.

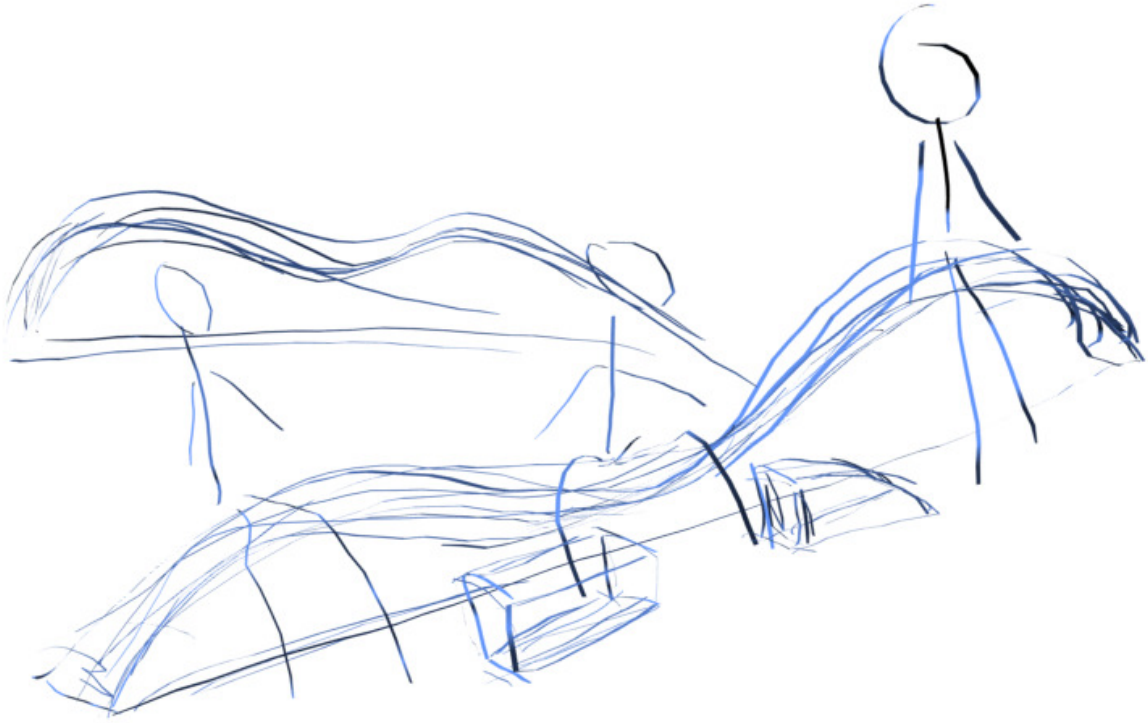


Abbildung 92: Skizze einer Couch mit Tischen (Aufgabe 1), erstellt in der virtuellen Bedingung.

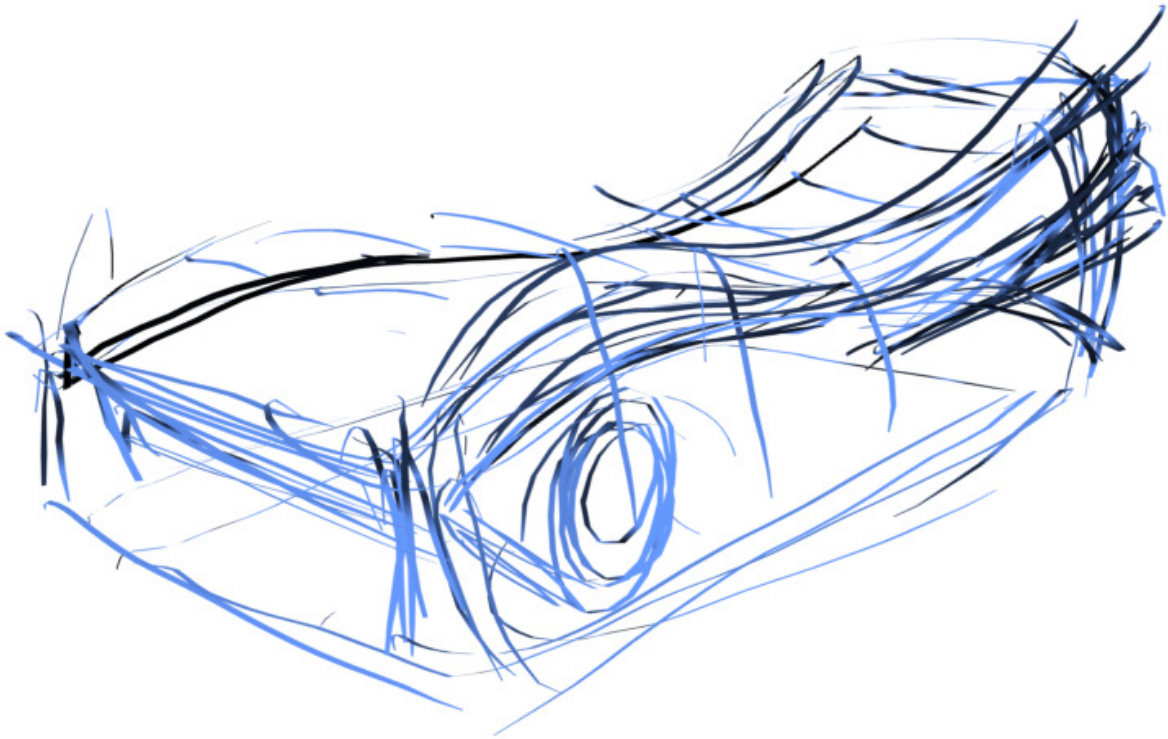


Abbildung 93: Skizze einer Schlafkapsel (Aufgabe 2), erstellt in der hybriden Bedingung.

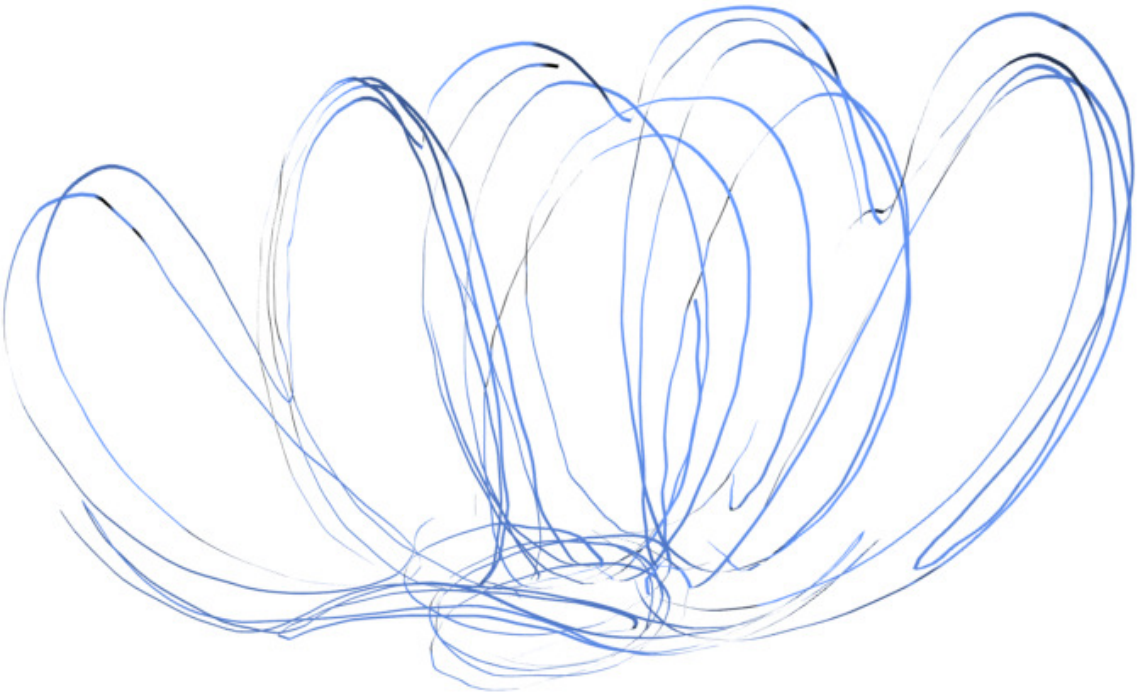


Abbildung 94: Skizze einer Schlafkapsel (Aufgabe 2), erstellt in der physischen Bedingung.

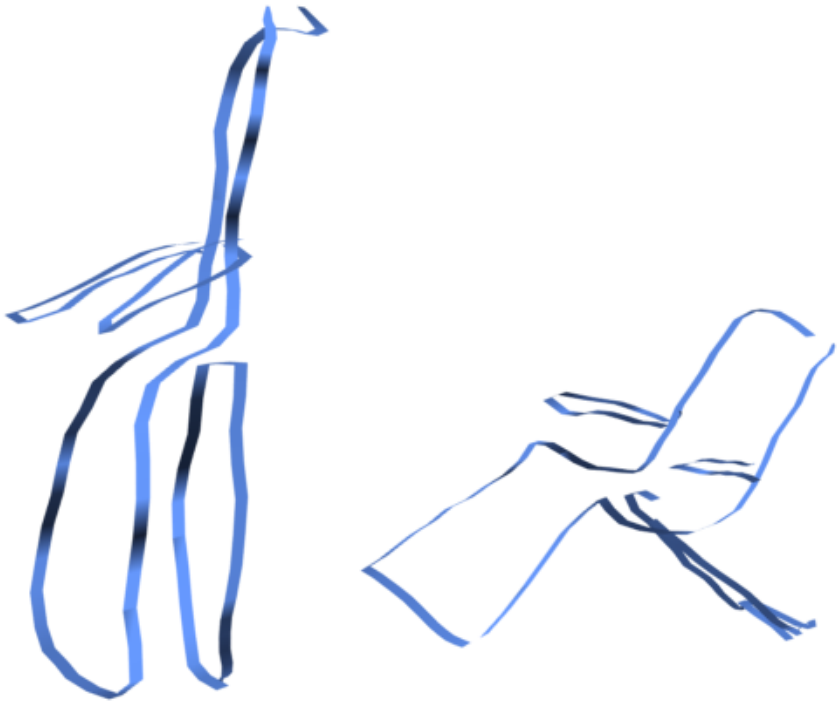


Abbildung 95: Skizze eines Massagestuhls (Aufgabe 3), erstellt in der hybriden Bedingung.

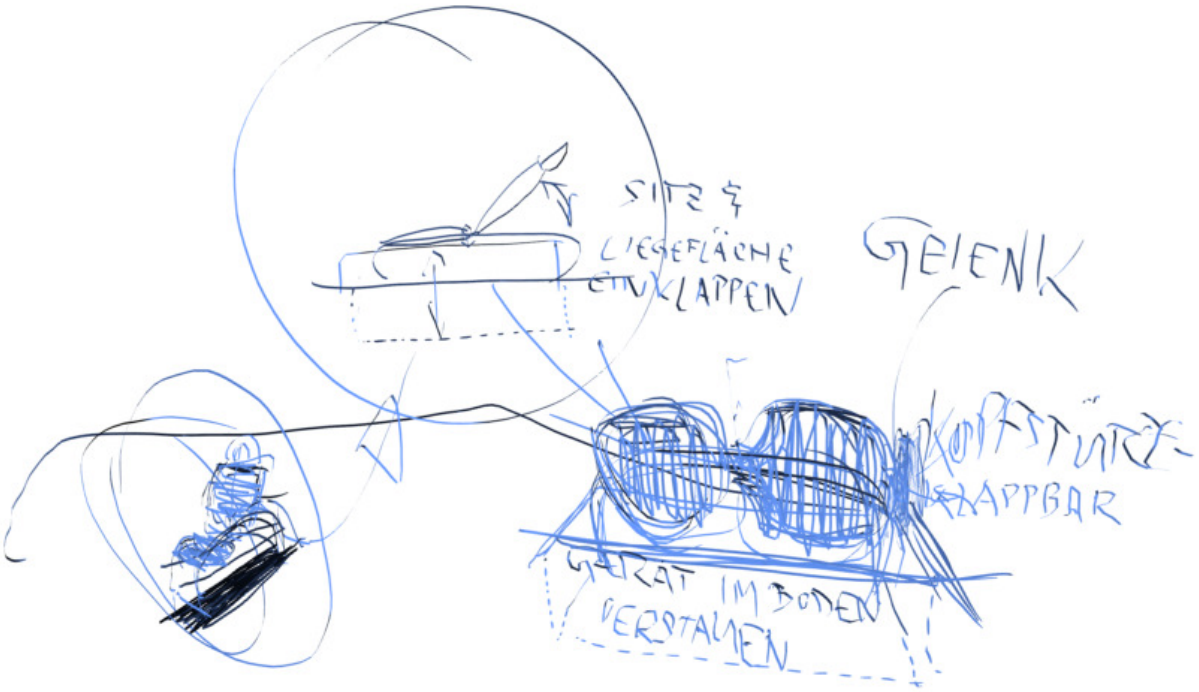


Abbildung 96: Skizze eines Massagestuhls (Aufgabe 3), erstellt in der physischen Bedingung.

Tabelle 22: Auswertung der visuellen und lösungsbezogenen Eigenschaften der Skizzen (Auswertung mittels Gemischter Linearer Modelle).

Effekt	M_P	SD_P	M_H	SD_H	M_V	SD_V	F_{REP}(2,df)	df	p_{REP}	η^2_{REP}
Anzahl der je Aufgabe angefertigten Skizzen	1,83	1,01	1,91	1,08	1,61	0,94	8,160	29,67	0,497	0,040
Anzahl der je Aufgabe erkennbaren Lösungs-ideen	1,21	0,51	1,26	0,62	1,17	0,39	0,113	50,34	0,893	0,004
Test zum Schöpferi-schen Denken Zeichne-risch TSD-Z	10,43	5,63	9,74	4,77	10,65	4,39	0,487	33,22	0,619	0,020

Tabelle 23: Auswertung der Expertenbewertung der Skizzen (Auswertung mittels Friedman-Tests, N=22).

	$Median_P$	IQR_P	$Median_H$	IQR_H	$Median_V$	IQR_V	$\chi^2(2)$	p_{REP}
Expertenbewertung 1: Allgemeine Anforderungen	1,00	0,00 – 2,00	1,00	-1,00 – 2,00	2,00	0,00 – 3,00	2,352	0,313
Expertenbewertung 2: Kreativer Wert des entworfenen Produkts	1,00	0,00 – 2,00	1,00	-1,00 – 2,00	2,00	-1,00 – 3,00	0,914	0,633
Expertenbewertung 3: Ästhetischer Wert der Skizze	0,00	-2,00 – 2,00	0,00	-1,00 – 2,00	1,00	-2,00 – 2,00	0,535	0,765
Expertenbewertung 4: Skizzenhaftigkeit	-1,00	-0,50 – 2,00	1,00	-1,00 – 3,00	2,00	0,00 – 3,00	0,525	0,769
Expertenbewertung 5: Mehrdeutigkeit	1,50	-1,00 – 2,00	2,00	-1,00 – 2,00	2,00	0,00 – 3,00	1,273	0,529

Tabelle 24: Auswertung der Abstraktionsniveaus der Skizzen (Auswertung mittels Cochran-Q-Test, N=22).

Effekt	f_P	f_H	f_V	$Q(2)$	p_{REP}
Abstraktionsstufe 1: Verwendung visuell-grafischer Elemente in der Skizze	18	15	16	1,077	0,584
Abstraktionsstufe 2: Verwendung schematischer Elemente in der Skizze	9	10	12	0,824	0,662
Abstraktionsstufe 3: Verwendung symbolischer Elemente in der Skizze	19	17	16	1,273	0,529
Abstraktionsstufe 4: Verwendung verbaler Elemente in der Skizze	1	3	1	2,000	0,368
Anzahl der Lösungsideen, bei denen eine Entwicklung der Lösungsidee in den zu einer Aufgabe gehörigen Skizzen erkennbar war.	11	14	6	7,538	0,023

9.8.2 Volumen und Detaillierungsgrad der Skizzen

Die Volumina der Skizzen unterschieden sich zwischen den Bedingungen nur gering (M_P=1,49 m^3, SD_P=1,26; M_H=1,35 m^3, SD_H=1,50; M_V=1,27 m^3, SD_V=1,19). Ein statistisch signifikanter Einfluss der Repräsentation der Werkzeuge konnte nicht ermittelt werden ($F_{REP}(2, 39{,}019)=0{,}188$, $p_{REP}=0{,}830$, $\eta^2_{REP}=0{,}0069$). Stattdessen wurden die Einflüsse der Aufgabe ($M_{Aufgabe1}$=1,61 m^3, $SD_{Aufgabe1}$=1,61; $M_{Aufgabe2}$=1,49 m^3, $SD_{Aufgabe2}$=1,21; $M_{Aufgabe3}$=1,03 m^3, $SD_{Aufgabe3}$=1,05) und eine Interaktion zwischen Skizzierwerkzeug und Aufgabe tendenziell signifikant ($F_{AUF}(2, 31{,}023)=2{,}847$, $p_{AUF}=0{,}073$, $\eta^2_{AUF}=0{,}1254$; $F_{REPxAUF}(4, 54{,}425)=2{,}172$, $p_{REPxAUF}=0{,}084$, $\eta^2_{REPxAUF}=0{,}1377$). Der Einfluss des Zufallsfaktors wurde signifikant (*Wald* Z=3,203, p=0,001). Anhand der Ergebnisse erscheinen Einflüsse der Repräsentation der Skizzierwerkzeuge auf das Volumen der Skizzen unwahrscheinlich und stattdessen interindividuelle Unterschiede sowie Einflüsse der Aufgabe wahrscheinlich.

Der Detaillierungsgrad der Skizzen, der wie in Studie 2 über die Anzahl der Linieneckpunkte operationalisiert wurde, zeigte zwischen den Bedingungen egenfalls keine signifikanten Unterschiede (M_P=4275, SD_P=2070; M_H=4140, SD_H=2427, M_V=4705, SD_H=3772; $F_{REP}(2, 39{,}00)=0{,}161$, $p_{REP}=0{,}852$, $\eta^2_{REP}=0{,}0078$). Auch die Einflüsse der Aufgabe und einer Interaktion zwischen Aufgabe und Skizziertechnik wurden nicht signifikant, jedoch der Einfluss des Zufallsfaktors (Wald Z=3,852, $p<0{,}001$). Daher kann auch für den Detaillierungsgrad der Skizzen von einem Einfluss interindividueller Unterschiede in der Problemlösung ausgegangen werden, ein Einfluss der Repräsentation der Skizzierwerkzeuge ist dagegen unwahrscheinlich.

▷ Einflüsse der Repräsentation der Skizzierwerkzeuge auf das Volumen und den Detaillierungsgrad der Skizzen konnten nicht gefunden werden.

9.9 Diskussion

9.9.1 Die Unterstützung des Skizzierprozesses, Aufmerksamkeitsverteilung und Kontrolle der Skizzierwerkzeuge (Hypothese 3.1)

Hypothese 3.1 postuliert Vorteile der hybriden Skizziertechnik aufgrund deren physischer Manipulierbarkeit und der optimalen visuellen Integration in die virtuelle Umgebung und die virtuell repräsentierte Skizze.

Die auf die Externalisierung innerer Lösungsbilder bezogenen Eigenschaften der Skizziertechniken wurden für die hybride und die virtuelle Bedingung durch die Teilnehmer ungefähr gleich hoch bewertet. Dies deutet darauf hin, dass die visuelle Integration der Stiftspitze in die virtuelle Umgebung (und damit in die virtuelle Skizze), die in beiden Bedingungen gegeben war, einen dominierenden Einfluss auf diese Bewertung hatte. Hervorstechend ist dabei die von den Teilnehmern insbesondere in der physischen Bedingung vielfach benannte Schwierigkeit, Verbindungs- und Endpunkte der Linien zu finden. Die physische Manipulierbarkeit mittels des Stiftgriffs konnte in der physischen Bedingung die Nachteile der visuellen Integration offenbar nicht ausgleichen und trat für die Bewertung der pragmatischen Qualität in den Hintergrund.

Auf die Reflektionsprozesse (das „Nachdenken“) während des Skizzierens hatte die Skizziertechnik nach Einschätzung der Teilnehmer keinen Einfluss. Da jedoch in der virtuellen Bedingung das Verhältnis zwischen Skizzieren und „Nachdenken“ (Externalisierung und Reflektion) zu Ungunsten des Skizzierens verschoben wurde, erscheint es möglich, dass die physische Repräsentation des Stiftgriffs in der hybriden und physischen Bedingung zum Skizzieren angeregt hat, und die Schwelle zum Einsatz des Skizzierwerkzeugs hier niedriger lag als in der virtuellen Bedingung.

Trotz fehlender Unterschiede zwischen der virtuellen und der hybriden Bedingung in der pragmatischen Qualität wurden diese nicht als identisch wahrgenommen. Da sich in den für die Allokation von Aufmerksamkeitsressourcen relevanten Kategorien Kontrollierbarkeit und Sicherheit Unterschiede zugunsten der hybriden Skizziertechnik zeigten, kann von einem förderlichen Einfluss der physischen Repräsentation des Werkzeuggriffs den Skizzierprozess ausgegangen werden.

Im Unterschied zu Studie 3 beurteilten die Teilnehmer die pragmatische Qualität des physischen Werkzeugs am geringsten. In Übereinstimmung mit den von Benutzern geäußerten Schwierigkeiten beim Wiederfinden von Punkten im Raum spricht dies für einen hohen Anteil von Positionierungsbewegungen beim Skizzieren. Bei diesen hatte das physische Werkzeug in Studie 3 die geringste Genauigkeit aller Werkzeuge erreicht, was den Teilnehmern aber aufgrund des fehlenden visuellen Feedbacks verborgen blieb. Da in dieser Studie das visuelle Feedback in Form der „virtuellen Tinte“ vorhanden war, wurde daran auch der Positionierungsfehler des physischen Werkzeugs sichtbar.

Die visuellen und lösungsbezogenen Eigenschaften der Skizzen sowie deren Volumina und Detailreichtum wurden von der Repräsentation der Skizzierwerkzeuge nicht beeinflusst. Aus diesem Widerspruch zwischen der subjektiven Bewertung durch die Teilnehmer und den skizzenbezogenen Bewertungsmaßen können drei alternative Schlussfolgerungen gezogen werden: 1. Die von den Teilnehmern wahrgenommenen Unterschiede der Skizziertechniken haben keinen Einfluss auf den Skizzierprozess und dessen Ergebnis. 2. Die verwendeten Erhebungsmethoden zur Bestimmung der Güte der Skizzen sind nicht geeignet, eventuell vorhandene Unterschiede zu messen. 3. Die Unterschiede und Mängel der Skizziertechniken wurden von den Teilnehmern zwar wahrgenommen und angesprochen (s. o.), jedoch kompensiert, so dass diese keinen messbaren Einfluss auf die Lösungsgüte hatten.

Aus der Auswertung des AttrakDiff-Fragebogens, den Ergebnisse der Inhaltsanalyse sowie der Auswertung des selbstentwickelten Fragebogens zum Skizzierprozess kann Unterstützung für die Hypothese 3.1 abgeleitet werden. Die Auswertung der visuellen und lösungsbezogenen Skizzeneigenschaften unterstützt die Hypothese 3.1 dagegen nicht.

- Die pragmatische Qualität sowie die Möglichkeiten zur Externalisierung innerer Bilder wurden für die hybride und virtuelle Skizziertechnik in etwa gleich eingeschätzt und lagen höher als die der physischen Skizziertechnik. Für diese Einschätzung war offenbar die visuelle Integration der Spitze des Skizzierwerkzeugs in die virtuelle Umgebung ausschlaggebend.

- Die Auswertung der Benutzeräußerungen und die Bewertung der Kontrollierbarkeit und Sicherheit zeigten Vorteile der hybriden Skizziertechnik gegenüber der virtuellen und physischen.

- Auf die visuellen und inhaltsbezogenen Eigenschaften der Skizzen hatte die Repräsentation der Skizzierwerkzeuge keinen messbaren Einfluss.

- Die bisher verwendeten Methoden zur Bewertung der Güte von Skizzen sollten verbessert werden, um gegebenenfalls vorhandene Unterschiede zwischen den Bedingungen sichtbar zu machen.

9.9.2 Flüssigkeit des Skizzierprozesses (Hypothese 3.2)

Die in Hypothese 3.2 postulierte Unterstützung der Flüssigkeit des Skizzierprozesses kann aufgrund der Auswertung der entsprechenden Items des selbstentwickelten Fragebogens nicht unterstützt werden. Hier ergaben sich keine Unterschiede zwischen den Bedingungen. Auch die Geschwindigkeit der Benutzerbewegungen, die Anhaltspunkte über die Flüssigkeit des Skizzierprozesses geben könnte, ermittelte keine Unterschiede zwischen den Bedingungen.

9.9.3 Stimulation durch die Skizziertechnik (Hypothese 3.3)

Unterstützung für die Hypothese 3.3 kann aus der Auswertung des AttrakDiff-Fragebogens abgeleitet werden. Wie schon in Studie 3 scheint die virtuelle Repräsentation des virtuellen bzw. der virtuelle Anteil des hybriden Skizzierwerkzeugs einen förderlichen Einfluss auf die Stimulation des Anwenders zu haben. Die Stimulation durch rein physische Objekte ist dagegen statistisch signifikant geringer. In der hedonistischen Dimension Identifikation, welche beispielsweise für Entscheidungen über die Anschaffung eines Systems relevant ist, erreicht die hybride Skizziertechnik die höchsten Werte.

Dass die Stimulation tatsächlich Auswirkungen auf das Skizzierergebnis hat, lässt sich auf Basis der Auswertung der visuellen und lösungsbezogenen Skizzeneigenschaften jedoch weder bestätigen noch verneinen (Abschnitt 9.9.1, S. 230).

▷ Die Stimulation (HQ-S) durch virtuell oder hybrid repräsentierte Skizzierwerkzeugen ist höher als durch physische Werkzeuge.

9.9.4 Schlussfolgerungen

Die auf den Befragungen der Teilnehmer basierenden Ergebnisse der Studie 4 zeigen eine Dominanz der Bedeutung der visuellen Integration der Skizzierwerkzeuge in die virtuelle Umgebung. Durch die virtuelle Repräsentation der Spitze der Skizzierwerkzeuge konnten Probleme, die im Zusammenhang mit der Integration physischer Objekte in virtuelle Umgebungen auftreten, reduziert werden (beispielsweise Akkommodations-Konvergenz-Konflikt und Trackingfehler, Abschnitt 4.4.1, S. 84). Die Gebrauchseigenschaften der virtuellen und hybriden Werkzeuge wurden von den Teilnehmern daher höher als die physischer Werkzeuge bewertet. Dass auch die physische Repräsentation des Griffs einen positiven Einfluss auf die Einschätzung durch die Teilnehmer hatte, wird anhand der Benutzeräußerungen und der Bewertung der hedonistischen Qualität Identifikation deutlich. Hier erzielte allein das hybride Skizzierwerkzeug die höchsten Werte.

▷ Das Konzept hybrider Werkzeuge – das physische Manipulierbarkeit mit visueller Integration in virtuelle Umgebungen verknüpft – erscheint für Skizzieraufgaben aus Benutzersicht im Vergleich zu physischen und virtuellen Werkzeugen als am besten geeignet.

Während sich in den Benutzeräußerungen der Studie 2 Unterschiede zwischen den Bedingungen insbesondere in der Kategorie des Skizzierprozesses zeigten, wurden in dieser Studie vor allem Unterschiede in der Kategorie zur sensumotorischen Steuerung der Werkzeuge sichtbar. Die Unterschiede zwischen den Bedingungen waren in dieser Studie insgesamt geringer als in Studie 2 und bezogen sich fast ausschließlich auf Auswertungen von Fragebögen und Benutzeräußerungen.

- Die Variation der Repräsentation des Skizzierwerkzeugs hat einen geringeren Einfluss auf den Skizzierprozess und das Skizzierergebnis als die Variation der räumlichen Freiheitsgrade des Skizziermediums.

9.10 Zusammenfassung

Die in diesem Kapitel geschilderte Studie untersuchte die Gestaltung von Skizzierwerkzeugen in Hinblick auf deren physische, virtuelle bzw. hybrid physisch/virtuelle Repräsentation. Die Studie baute auf der Studie 2, in der Hinweise auf ein Unterstützungspotenzial immersiver dreidimensionaler Umgebungen für kreative Selbstkommunikationsprozesse gefunden wurden, und der Studie 3 auf, in der Hinweise auf Vorteile hybrider Interaktionsobjekte für die Lösung basaler Manipulationsaufgaben gefunden wurden. Analog zu den Studien 2 und 3 wurde diese Studie in einer immersiven VR-CAVE-Umgebung durchgeführt. Es nahmen 24 Personen teil, die jeweils drei Aufgaben zum Entwurf von Möbeln zu lösen hatten. Zur Lösung der Aufgabe wurden physische, virtuelle und hybride Skizzierwerkzeuge eingesetzt.

Die Auswertung der Studie ergab:

- Hybride und virtuelle Skizzierwerkzeuge integrieren sich besser in virtuelle Umgebungen als rein physische Werkzeuge. Dies wird von den Benutzern als besonders wichtig eingeschätzt. Rein physische Skizzierwerkzeuge erschweren insbesondere das Wiederfinden von Punkten im Raum, was beispielsweise wichtig ist, um an Linienenden weiterzuzeichnen.

- Auch die physische Repräsentation des Werkzeuggriffs hat einen positiven Einfluss auf die Einschätzung der Gebrauchstauglichkeit des hybriden Skizzierwerkzeugs. Der Vorteil durch die physische Manipulierbarkeit wird durch die Teilnehmer aber geringer als die visuelle Integration gewichtet.

- Das Konzept hybrider Skizzierwerkzeuge wurde von den Teilnehmern der Studie verstanden und akzeptiert. Im Faktor Hedonistische Qualität Identifikation (HQ-I) – welche beispielsweise bei Entscheidungen zur Anschaffung neuer Systeme wesentlich ist – erzielte das hybride Werkzeug die höchsten Werte.

- Die Effekte durch die Variation der Repräsentation des Skizzierwerkzeugs sind geringer als

die Effekte durch die Variation der räumlichen Freiheitsgrade des Skizziermediums in Studie 2.

▷ Die Trennschärfe der Methoden zur Bewertung der visuellen und lösungsbezogenen Eigenschaften von Produktskizzen in frühen Entwicklungsphasen sollten verbessert, und neue Bewertungsmethoden entwickelt werden.

Aus den Ergebnissen der empirischen Studien dieser Arbeit werden im folgenden Kapitel Implikationen für den Einsatz immersiver dreidimensionaler Skizziersysteme und für die Gestaltung von Mixed-Reality Interaktionswerkzeugen abgeleitet.

10
Zusammenfassung und Fazit

10.1 Zusammenfassung

Skizzieren ist eine bedeutende Unterstützungsmethode in frühen, konzeptionellen Produktentwicklungsphasen. Auch im Zeitalter digitaler Medien haben analoge Skizzen auf Papier und skizzierendes Modellieren beispielsweise mit Ton und Formmodellen ihre Bedeutung behalten. Ausschlaggebend für die wichtige Stellung des Skizzierens im Produktentwicklungsprozess sind mehrere Faktoren, dazu zählen unter anderen:

- Skizzen entlasten das Arbeitsgedächtnis und erhöhen die Menge der während der Lösung des Design-Problems zur Verfügung stehenden Informationen;
- Skizzieren ist besonders geeignet, innere Produktbilder zu externalisieren, im äußeren Medium zu objektivieren und zu reflektieren (Selbstkommunikation);
- Skizzieren unterstützt kreative Lösungssuche, da ein leichter Übergang zwischen lösungssuchenden, nicht-fixierenden, gestischen Bewegungen zu fixierenden, zeichnenden Bewegungen ermöglicht wird;
- Skizzieren erlaubt ein „opportunistisches Vorgehen mit systematischen Episoden“ (Hacker, 2002, S. 14), d. h. es erfordert, im Unterschied zu CAD-Werkzeugen, keine „systematisch-hierarchische Zielzerlegung und Maßnahmenplanung, (...) sondern der Planungsprozess kann auf jeder Abstraktionsstufe beginnen und in jede Richtung weitergeführt werden“ (Zempel, 2002, S. 31);
- Der geringe zeitliche Aufwand zum Erzeugen von Skizzen, deren Mehrdeutigkeit und die Möglichkeit, mit geringen Kosten viele Lösungsvarianten anlegen zu können, ermöglichen eine schnelle Durchdringung des Problem- und Lösungsraums (vgl. Buxton, 2007).

Augrund der mannigfaltigen Vorteile wurde vielfach vorgeschlagen, das Skizzieren in den Workflow der Virtuellen Produktentstehung zur integrieren (vgl. u. a. Sutherland, 1964; Krause & Lüddemann, 1996; Kehler, 1998; Hummels, 2000; Hacker, 2002; Sachse, 2002; Römer, 2002; Tversky, 2003; Buxton, 2007). Bestehende CAD-Werkzeuge (und auch deren WIMP-basierte sogenannte „Skizzier“-Modi) unterstützen dies bisher jedoch nur in begrenztem Maß. Nachteilig ist insbesondere, dass CAD-Werkzeuge keine flüssige Interaktion zwischen Benutzer und äußerem Produktbild erlaubt, sie erfordern statt dessen einen formal-abstrakten Prozess der Lösungssuche, und zerteilen das Modellieren in ein „Hin und Her, bei dem die Handlungsschritte (Druck auf Tastatur, Maus, board oder pad) in den Takt der Rechenmaschine verkettet sind“ (Petruschat,

2001b, S. 70). Als Unterstützungswerkzeug für die Lösungssuche sind CAD-Werkzeuge daher nur eingeschränkt geeignet (vgl. Römer, 2002).

Neuartige Benutzungsschnittellen zur skizzenhaften Modellierung wurden seit dem Ende der 1990er Jahren entwickelt. Sie verzichten auf umfangreiche, menübasierte Kontrollelemente und fokussieren auf intuitive, vereinfachte Modelliertechniken (vgl. Cook & Agah, 2009). Standardisierte Interaktionstechniken des skizzenhaften Modellierens haben sich jedoch bisher noch nicht herausgebildet. Stattdessen existieren verschiedene komplementäre Ansätze, beispielsweise 2D-Freihandskizzieren mittels Grafiktabletts, Systeme zur automatisierten Erkennung von Objekten anhand von Skizzen und immersive 3D-Skizziersysteme (vgl. u. a. Cook & Agah, 2009; Johnson et al., 2009). Letztere stellen dem Designer mittels Virtual Reality-Technologien ein dreidimensionales Medium zur Verfügung, in dem er freihändig skizzieren und modellieren und die erstellten Formen räumlich (stereoskopisch) betrachten kann.

Bisherige empirische Untersuchungen ermittelten verschiedene primäre Vorteile des immersiven Skizzierens und Modellierens (Kapitel 5):

- *Dreidimensionalität:* Das direkte Arbeiten im dreidimensionalen Raum entspricht der Dreidimensionalität der entworfenen Produkte, vermindert die Notwendigkeit, Schnitte oder perspektivische Darstellungen erstellen zu müssen, und erleichtert die Entwicklung einer räumlichen Vorstellung des Produkts.
- *Eins-zu-eins-Proportionalität:* Die Möglichkeit des Skizzierens und Modellierens von Produktmodellen im Maßstab „eins-zu-eins".
- *Interaktivität (Embodiment)*: Die Einbeziehung des Körpers durch Körperbewegungen während des Modellierens.
- *Digitalität*: Die Vermeidung von Medienbrüchen durch die Weiterverwendung der digital vorliegenden dreidimensionalen Skizzen.

Die Ergebnisse bisheriger empirische Studien können jedoch aufgrund teilweise mangelhafter Ausführung, sehr geringer Teilnehmerzahlen oder einer Übergewichtung von Teilnehmern mit künstlerischem Hintergrund nur begrenzt verallgemeinert werden. Auch blieben wichtige Forschungsfragen bisher unbeantwortet:

- *Freiheitsgrade*: Wie nutzen Designer den dritten räumlichen Freiheitsgrad im Vergleich zum Skizzieren mit zwei räumlichen Freiheitsgraden? Erschließt das dreidimensionale Skizzieren im Vergleich zum zweidimensionalen Skizzieren neue Unterstützungsfunktionen für kreative Entwurfsprozesse?
- *Skizzierwerkzeuge*: Welchen Einfluss hat die Gestaltung der Werkzeuge auf den Skizzierprozess?
- *Wahrnehmung*: Wie wirken sich die in immersiven Umgebungen in Bezug auf visuelle Wahrnehmung und sensumotorische Kontrolle geltenden Bedingungen auf den Skizzierprozess aus?

- *Benutzerempfinden*: Wie nehmen Benutzer die pragmatischen und hedonistischen Qualitäten des immersiven Skizzierens wahr?

Diese Forschungsfragen wurden in dieser Arbeit zunächst in Hinblick auf Aspekte der menschlichen Kognition und Wahrnehmung diskutiert (Kapitel 3 und 4). Lösungsansätze wurden aus der Perspektive der Mensch-Maschine-Interaktion, insbesondere anhand der Konzepte Virtuelle Realität und Tangible User Interfaces entwickelt (Kapitel 4).

Das Vorgehen dieser Arbeit orientierte sich am User Centered Design (UCD) und bezog die potenziellen Anwender immersiver Skizziersysteme mehrfach ein. Durch das systematische Vorgehen konnten wesentliche Unterstützungsfunktionen des immersiven Skizzierens sowie weiterer Entwicklungs- und Forschungsbedarf ermittelt werden. Diese Arbeit konnte damit einen Beitrag für eine mögliche industrielle Anwendung des immersiven Skizzierens liefern.

Studie 1 widmete sich der Frage: *„Welchen Nutzen erwarten die avisierten Designer und Konstrukteure von immersiven dreidimensionalen Skizziersystemen?"* (Kapitel 5) Hierzu wurde der qualitative Forschungsansatz mittels Fokusgruppen gewählt, an denen insgesamt 14 Teilnehmer aus der Arena Möbeldesign teilnahmen. Aufbauend auf vorherigen Studien konnten vier zentrale zu erwartende Vorteile des immersiven dreidimensionalen Skizzierens gegenüber herkömmlichen Skizziermethoden ermittelt bzw. vorherige Studien (s. o.) bestätigt werden:

- *Räumlichkeit*: Die Möglichkeit, „mit dem Raum zu arbeiten", räumliche Modelle zu erschaffen und die Raumwirkung der erstellten Modelle wahrzunehmen.
- *Proportion:* Die Möglichkeit, Modelle im Maßstab „eins-zu-eins" zu skizzieren.
- *Assoziation:* Die Möglichkeit, vorhandene räumliche Objekten „in den Raum zu holen und damit weiterzuarbeiten"
- *Formbarkeit*: Die Möglichkeit, räumliche Skizzen zu verformen

Die Studie ergab darüber hinaus, dass immersives dreidimensionales Skizzieren bei den avisierten Nutzern stark positiv konnotiert und die Bereitschaft vorhanden ist, entsprechende Systeme industriell zu erproben.

In Studie 2 (Kapitel 7) wurde daraufhin experimentell untersucht, ob sich die erwarteten Vorteile empirisch stützen lassen. Die zugrunde liegende Forschungsfrage war: „*Erschließt das dreidimensionale Skizzieren im Vergleich mit dem zweidimensionalen Skizzieren qualitativ neue Unterstützungsfunktionen für kreative Entwurfsprozesse? Wo liegen Vor- und Nachteile?"* Es wurde dazu erstmals eine vergleichende Studie des Skizzierens mit zwei und drei räumlichen Freiheitsgarden unter wahrnehmungsbezogen identischen Bedingungen durchgeführt. Die Studie, an der 24 Möbeldesigner teilnahmen, untersuchte die Effekte der zusätzlichen Verfügbarkeit des dritten räumlichen Freiheitsgrades auf den Skizzierprozess und die Skizzierergebnisse. Die statistische Auswertung ließ mehrere Unterschiede erkennen:

- *Visuelle Eigenschaften der Skizzen (Perspektivische Darstellung, Proportionalität, Skizzenvolumen):* Die Skizzen, welche in der 3D-Bedingung erstellt wurden, waren häufiger perspektivisch und proportional gezeichnet als die Skizzen der 2D-Bedingung. Sie hatten ebenfalls ein größeres

Volumen und nahmen eine größere Fläche ein, als die Skizzen der 2D-Bedingung. Der dreidimensionale Raum wurde demnach produktiv zur Entwicklung der Lösungsideen genutzt.

- *Interaktivität (Embodiment):* Die Teilnehmer zeigten sich in der 3D-Bedingung wesentlich agiler und bewegten sich schneller als in der 2D-Bedingung. Es kam zu Interaktionen mit skizzierten Objekten, beispielsweise versuchten Teilnehmer, sich in skizzierte Stühle zu setzen. Die Teilnehmer gewannen so umfassendere Eindrücke und Informationen über ihre Entwürfe als in der 2D-Bedingung.

- *Wahrgenommene pragmatische und hedonistische Qualitäten:* Das Skizzieren mit drei räumlichen Freiheitsgraden wurde als pragmatischer, stimulierender und zufriedenstellender wahrgenommen als mit zwei räumlichen Freiheitsgarden. Die Teilnehmer haben die Möglichkeiten des dritten räumlichen Freiheitsgrades positiv angenommen.

Sichtbar wurde jedoch auch, dass das Skizzieren ohne physischen Widerstand, wie ihn beispielsweise Papier bietet, erhöhten sensumotorischen Koordinations- und Lernaufwand vom Anwender abverlangt. Häufig wurden Funktionen gewünscht, die ein Ausrichten und Wiederfinden von Punkten im Raum ermöglichen (sogenannte Snapping-Funktion).

Zusammenfassend zeigte die Studie 2, dass immersives Skizzieren Alleinstellungsmerkmale aufweist, die ein wichtiges und neuartiges Unterstützungspotenzial für kreative Entwurfstätigkeiten erschließen können.

Die folgenden Studien 3 und 4 (Kapitel 8 und 9) suchten Antworten auf die Frage: „*Wie wirkt sich die Gestaltung der Schnittstelle zwischen Anwender, Interaktionswerkzeug und virtueller Umgebung auf die Lösung einfacher Interaktionsaufgaben (Studie 3) und komplexer Skizzieraufgaben aus (Studie 4)?*“ Die Studien widmeten sich einer Funktionsallokation zwischen physischen und virtuellen Anteilen der Schnittstelle. Aufbauend auf dem Modell der Selbstkommunikation wurden potenzielle Störungsfaktoren identifiziert und systematisch variiert. Als wesentliche Faktoren wurden:

- die physische Manipulierbarkeit der Interaktionswerkzeuge,

- die Einbettung des Werkzeugs in die virtuelle Umgebung, damit verbunden

- der Einfluss des Akkommodations-Konvergenz-Konflikts zwischen virtuellen und physischen Anteilen der Szene und

- die mit der Interaktion mit virtuellen Objekten verbundene Latenzzeit und Wiederholrate der Darstellung

variiert, indem physische, hybrid physisch/virtuelle und virtuelle Interaktionswerkzeuge in den Versuchsbedingungen Verwendung fanden.

Der arbeitswissenschaftlichen Methodik von McCormick (1970) und Mundel (1978) folgend, welche u. a. Bowman et al. (2005) auch für Untersuchungen in virtuellen Umgebungen vorschlagen, untersuchte Studie 3 zunächst basale Interaktionsaufgaben (canonical manipulation tasks) zur Positionierung und Orientierung von Objekten im virtuellen Raum. Diese basalen Interaktionsaufgaben können als Grundlage immersiver Skizziertechniken betrachtet werden, welche aus Positionierungs- und Orientierungsaufgaben zusammensetzt bzw. kombiniert sind.

Die Ergebnisse der Studie 3, an der 36 Personen teilnahmen, lassen erkennen, dass sowohl physische als auch virtuelle Anteile von Interaktionswerkzeugen Vorteile für die Interaktion in virtuellen Umgebungen bieten, und dass hybride physisch/virtuelle Werkzeuge diese Vorteile zum Teil integrieren können:

- So zeigte sich, dass mittels physisch repräsentierter Interaktionswerkzeuge schneller als mittels virtuell repräsentierter Interaktionswerkzeuge interagiert werden kann. Dies lässt sich, aufgrund der Vergleiche zu hybrid repräsentierten Interaktionswerkzeugen, sowohl auf die physische Manipulierbarkeit als auch auf Unterschiede der visuellen Darstellung zurückführen, die im Fall der physischen Objekte ohne visuelle Verzögerung (Latenz) und mit einer vernachlässigbar hohen Darstellungswiederholrate geschieht. Hybride Werkzeuge bieten zwar physische Manipulierbarkeit, sind aber zum Teil virtuell repräsentiert und daher einer Latenz der visuellen Darstellung unterworfen. Die Geschwindigkeit der Aufgabenlösung mittels hybrider Werkzeuge liegt daher zwischen denen mittels physischer und virtueller Werkzeuge.

- Ein etwas anderes Bild zeigt sich hinsichtlich der Genauigkeit der Aufgabenausführung. Für Rotationsaufgaben erzielen Teilnehmer mit physischen Interaktionswerkzeugen die höchsten Genauigkeiten, hybride und virtuelle liegen gleichauf. Bei Positionierungsaufgaben führt der Einsatz rein physischer Interaktionswerkzeuge dagegen mit Abstand zu den ungenauesten Ergebnissen. Offenbar sind hier die Auswirkungen des Akkommodations-Konvergenz-Konflikts besonders gravierend, welche bei der Rotationsaufgabe, bei der kein örtlicher Abgleich zwischen realer und virtueller Umgebung notwendig war, nicht ins Gewicht fielen.

- Schließlich ergab die Studie 3, dass sich die Teilnehmer durch virtuelle und hybride Interaktionsgeräte am meisten stimuliert fühlten (hedonistische Qualitäten), physische Objekte aber als am besten zur Aufgabenlösung geeignet ansahen (pragmatische Qualität).

Da Skizzierinteraktionen aus Positionierungs- und Orientierungsbewegungen zusammengesetzt sind, konnte aufgrund der divergierenden Ergebnisse der Studie 3 keine Vorhersage der Güte verschieden repräsentierter Skizzierwerkzeuge abgeleitet werden. Diese Frage wurde daher in Studie 4 (Kapitel 9) untersucht, an der 24 Möbeldesigner teilnahmen. Die Ergebnisse der Studie 4 zeichnen tatsächlich ein anderes Bild:

- Die Teilnehmer bewerteten die visuelle Integration der Skizzierwerkzeuge in die virtuelle Szene bzw. in die virtuelle Skizze besonders hoch. Hybride und virtuelle Skizzierwerkzeuge wurden hier besser bewertet als physische Werkzeuge. Rein physische Skizzierwerkzeuge erschweren insbesondere das Wiederfinden von Punkten im Raum, beispielsweise um Linienenden wiederzufinden. Der in Studie 3 ermittelte Nachteil physischer Werkzeuge zur Durchführung von Positionierungsaufgaben scheint beim Skizzieren besonders stark gewichtet zu werden.

- Die physische Repräsentation des Werkzeuggriffs hat einen positiven Einfluss auf die Einschätzung der Gebrauchstauglichkeit des hybriden Skizzierwerkzeugs. Der Vorteil durch die physische Manipulierbarkeit wird von den Teilnehmern aber geringer als die Vorteile der visuellen Integration bewertet.

- Das hybride Skizzierwerkzeug wurde von den Teilnehmern im hedonistischen Faktor Identifikation (HQ-I) am höchsten bewertet, dieser ist beispielsweise bei Entscheidungen zur Anschaffung neuer Systeme wesentlich.
- Lösungsrelevante Unterschiede in den Skizzen konnten zwischen den Bedingungen wie in Studie 2 nicht gefunden werden.

Nach der Auswertung der Studie 4 erscheinen hybride Skizzierwerkzeuge, die die Stiftspitze virtuell und den Griff physisch repräsentieren, als optimale Gestaltungsvariante immersiver Skizzierwerkzeuge.

10.2 Fazit und Ausblick

10.2.1 Das immersive Skizzieren im Methodenkanon der Virtuellen Produktentstehung

Mit der vorliegenden Arbeit wurden der Charakter des immersiven dreidimensionalen Skizzierens und dessen Unterstützungspotenzial für die Prozesse der Virtuellen Produktentstehung herausgearbeitet. Hierzu wurden die Effekte der Verfügbarkeit eines zusätzlichen dritten räumlichen Freiheitsgrades beim Skizzieren sowie die Auswirkungen der Werkzeuggestaltung auf basale Interaktionsaufgaben und komplexe Skizzieraufgaben untersucht. Auf der Zusammenfassung der Ergebnisse dieser Arbeit (Abschnitt 10.1, S. 235) aufbauend können wichtige Hinweise für mögliche industrielle Investitionen und folgende Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten gegeben werden. Diese sprechen nachdrücklich für einen produktiven Einsatzes immersiver Skizziertechnologien und hybrid gestalteter Skizzierwerkzeuge in Produktentwicklungsprozessen.

Aufgrund der Ergebnisse dieser Arbeit kann folgendes Fazit gezogen werden:

- ▷ Der Charakter des immersiven Skizzierens wird durch die Kombination von immersiver dreidimensionaler Visualisierung, interaktiver Einbeziehung des Entwerfenden und durch stimulierende hedonistische Effekte geprägt.
- ▷ Diese Alleinstellungsmerkmale kennzeichnen das Potenzial des immersiven Skizzierens als elementare Unterstützungsmethode im Methodenkanon der Virtuellen Produktentstehung.
- ▷ Das immersive Skizzieren erweitert insbesondere die herkömmlichen Methoden des papierbasierten Skizzierens und Desktop-basierten CAD-Modellierens um immersive, interaktive und stimulierende Eigenschaften.
- ▷ Als zusätzliche unterstützende Methode kann das immersive Skizzieren in vielen VR-basierten Anwendungen der Virtuellen Produktentstehung nutzbringend integriert werden.

Obwohl das immersive Skizzieren in dieser Arbeit als autarke Methode untersucht wurde, wird es, wie das zweidimensionale Skizzieren auch, seine Anwendung in der Kombination mit anderen Methoden der Virtuellen Produktentstehung finden. Wie kann die neue Methode des immersiven Skizzierens jedoch in den Workflow der Virtuellen Produktentstehung integriert werden? Statt in einem abgegrenzten Nutzungsszenario ist der Einsatz des immersiven Skizzierens als elementare Unterstützungsfunktion verschiedener Tätigkeiten des Produktentstehungsprozesses zu sehen. So wird Designern und Produktentwicklern die Möglichkeit gegeben, das immersive Skizzieren neben anderen Methoden im Produktentwicklungsprozess einzusetzen, wenn es ihnen „opportun" erscheint, d. h. wenn sie sich vom Einsatz dieser Methode Vorteile versprechen[1] (vgl. Abbildung 97). Hierzu sind mehrere Voraussetzungen zu erfüllen:

Persönliche Voraussetzungen:

- Die potenziellen Anwender müssen die Eigenschaften und Vorteile des immersiven Skizzierens kennen, um individuelle Anwendungsstrategien entwickeln und im aktuellen Entwicklungsprozess situativ über den optimalen Einsatz der Methoden entscheiden zu können.
- Aufgrund der Neuartigkeit der Methode und des zusätzlichen motorischen Steuerungsaufwands muss den potenziellen Anwendern daher die Möglichkeit zum Erlernen neuer Skizzierfertigkeiten gegeben werden (vgl. Schön, 1983); dies wäre beispielsweise im Rahmen universitärer Ausbildung möglich. Der Lernerfolg sollte zunächst mit Langzeitstudien überprüft und ggf. dezidierte Trainingsmodule erarbeitet werden.

Infrastruktur/Workflow der Virtuellen Produktentstehung/CAD-Anbindung:

- Das immersive Skizzieren sollte organisatorisch und informationstechnisch in den Workflow und die Infrastruktur der Virtuellen Produktentwicklung integriert werden und mühelos anwendbar sein. In einem ersten Schritt ist es wünschenswert, eine bidirektionale online-Anbindung an Desktop-basierte CAD-Modelliersysteme zu realisieren, die es erlaubt, immersive Skizzierhandlungen am Desktop und CAD-Modellierhandlungen in der immersiven Umgebung zeitgleich zu verfolgen (vgl. Abbildung 97). Als Vorstufe ist eine offline-Anbindung möglich, die die Übertragung der Datenmodelle zwischen CAD und immersiver Umgebung auf Knopfdruck erlaubt. Hierfür sind geeignete Methoden zu entwickeln, die die parametrischen Modelle der CAD-Werkzeuge mit den für immersive Anwendungen notwendigen Oberflächenmodellen verknüpfen.
- Um das immersive Skizzieren zu etablieren und Medienbrüche zwischen den Werkzeugen zu vermeiden, sollten während des Entwicklungsprozesses entstandene dreidimensionale Skizzen in Produktdatenmanagementsystemen (PDM) verwaltet werden. Sie könnten beispiels-

[1] Nach dem Prinzip der kognitiven Ökonomie setzen Entwickler und Designer im Entwicklungsprozess situativ diejenigen Methoden ein, von denen sie die größte Unterstützung für die aktuellen „intellektuellen Bearbeitungsoperationen, (...) Gedächtnisaktivierungsprozesse sowie (...) die beanspruchte Mentalkapazität [erwarten]" (Sachse, 2002, S. 15; vgl. auch „opportunistischen Vorgehens mit systematischen Episoden" bei Hacker, 2002, S. 14).

weise als Kommunikationsgrundlage zwischen den am Entwicklungsprozess Beteiligten dienen, als erste CAD-Modelle eines Entwurfs eingestellt werden bzw. als schnell zu erstellende Platzhalter für Baugruppen und Bauteile dienen, die erst spät konstruiert, jedoch schon früh in groben Abmaßen vorliegen sollen.

- Zur Integration könnten dreidimensionale Skizzen als Schicht (engl. *layer*) in CAD-Modelle integriert werden. Somit wären sie in CAD-Systemen einfach ein- und ausblendbar, und der aktuelle Konstruktionsstand könnte regelmäßig mit der Ursprungsintention verglichen werden. Insbesondere Annotationen, die in der 3D-Skizze erstellt wurden, könnten so visuell über das Modell gelegt werden und den Entwicklungsprozess informieren.

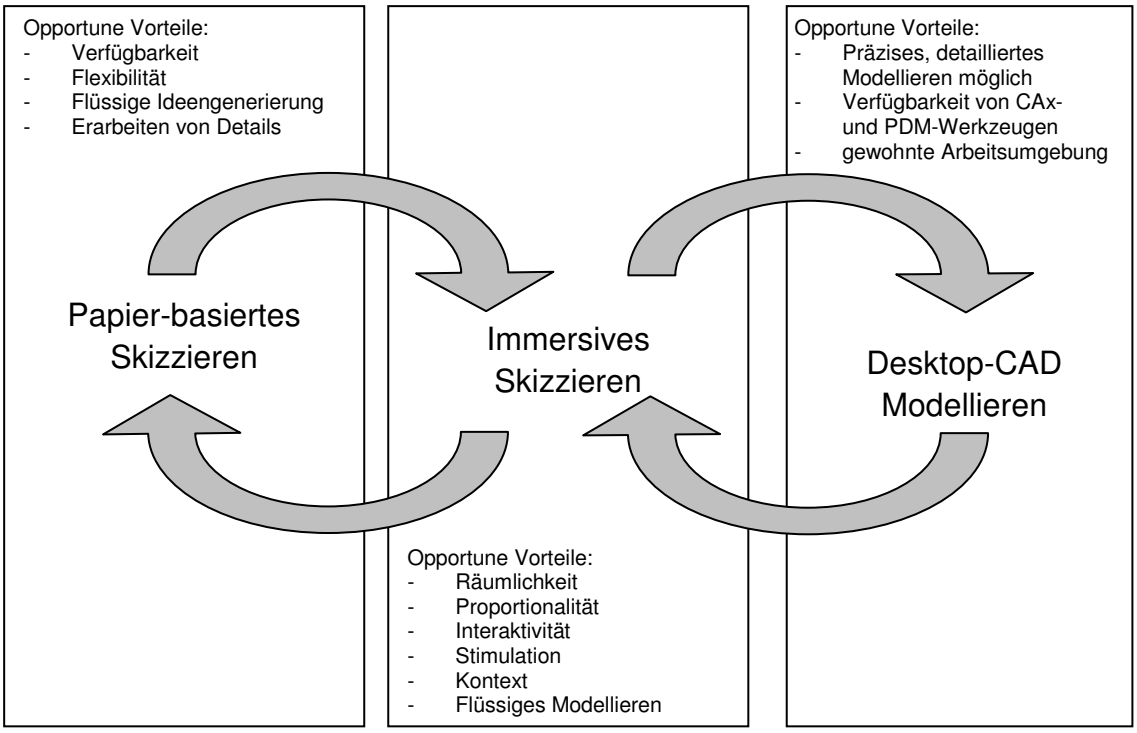


Abbildung 97: Einsatz des immersiven Skizzierens im Methodenkanon der Virtuellen Produktentstehung in situativer Abwägung opportuner Vorteile.

Die prototypische Anwendung und das derzeit größte Nutzungspotenzial des immersiven Skizzierens kann im beschriebenen Kanon aus herkömmlichem papierbasierten Skizzieren und der Modellierung mittels Desktop-CAD-Systemen gesehen werden. Darüber hinaus existieren weitere Anwendungsfelder, die einen unmittelbaren Nutzen versprechen, beispielsweise:

Anwendung des immersiven Skizzierens in interaktiven Design-Reviews

Die stärkste industrielle Verbreitung finden VR-Technologien bisher im Gebiet interaktiver Design-Reviews (vgl. Stark & Krause, 2008; Knöpfle, 2003). Hierbei kommen Desktop-VR-Systeme und immersive Systemen zum Einsatz, die es erlauben, Produkte visuell abzusichern. Häufig werden dabei funktionale und ästhetische Eigenschaften überprüft oder die Montierbarkeit von Baugruppen und -elementen evaluiert. Ein Nachteil dieser Anwendungen besteht darin, dass die

während immersiver Design-Reviews gewonnenen Erkenntnisse nicht direkt im immersiven Medium gespeichert werden können, sondern extern notiert und als Annotationen in PDM-Systeme überführt werden müssen. Außerdem ist es aufgrund fehlender Interaktionstechniken nicht möglich, Formveränderungen am virtuellen Modell vorzunehmen und interaktiv Gestaltungsvarianten zu testen.

Die Integration des immersiven Skizzierens in Design-Reviews könnte diesen wesentliche neue Impulse verleihen (vgl. Abbildung 98). Zum einen würde es ermöglicht, Anmerkungen, Symbole und Markierungen direkt im digitalen Modell anzubringen (engl. *redlining*), wodurch die Aussagekraft des digitalen Modells und seine Funktion als digitaler Master wesentlich gestärkt würden. Zum anderen könnten Ideen zu Produktvarianten, die häufig während interaktiver Design-Reviews entstehen, sofort vor Ort festgehalten und visuell überprüft werden. Insgesamt ist durch die Integration des immersiven Skizzierens eine Erleichterung des Informationsrückflusses aus den Design-Reviews in den Entwicklungsprozess bei gleichzeitig erhöhter Informationsdichte zu erwarten.

Die softwaretechnische Integration des immersiven Skizzierens in industrielle VR-Systeme stellt dabei kein großes Hindernis dar, da viele dieser Systeme eine Programmierschnittstelle (API) zur Integration zusätzlicher Funktionalitäten anbieten.

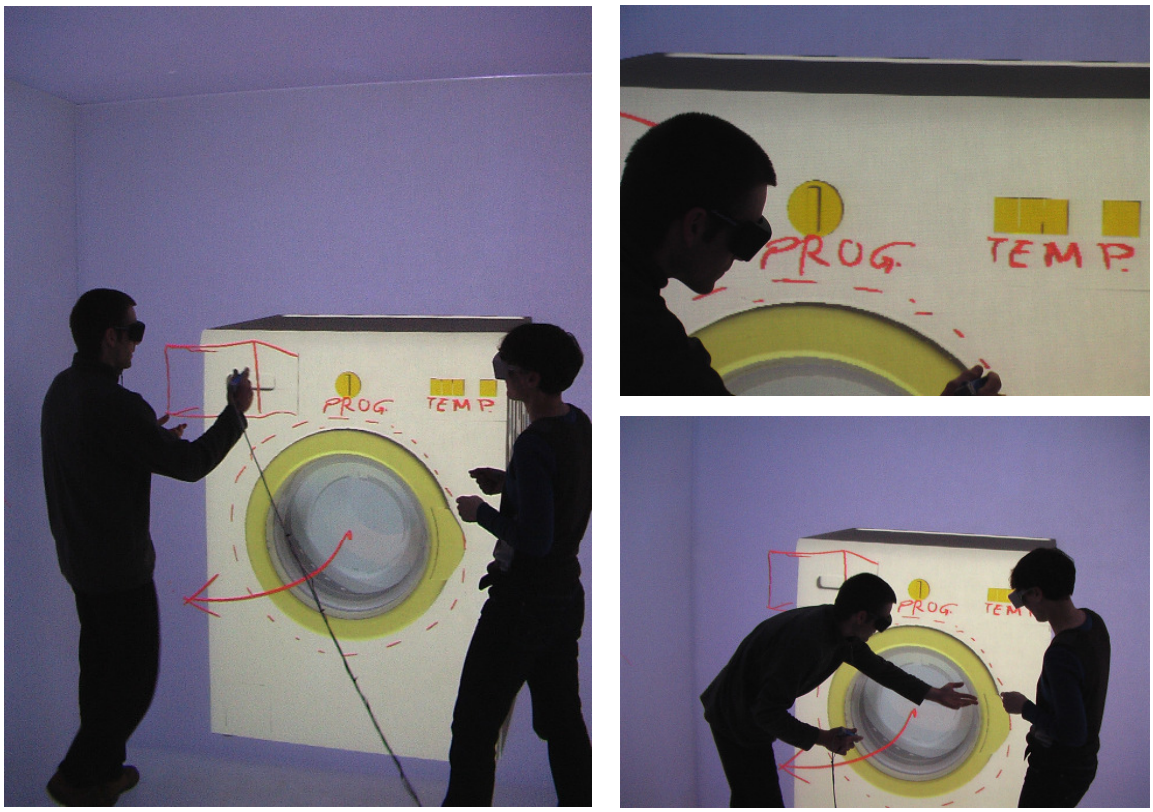


Abbildung 98: Anwendung des immersiven Skizzierens während eines interaktiven Design-Reviews.

Erweiterung des immersiven Skizzierens zu einer durchgängig nutzbaren Modelliermethode:

In Erwartung zukünftiger Entwicklungen der VR-Technologie und der CAD-Modelliertechniken kann ein Konzept eines durchgängigen immersiven Modelliersystems skizziert werden, bei dem große Teile der Modelliertätigkeit im immersiven Medium geschehen. Als Pole stehen sich dabei die freihändige, skizzenhafte Modellierung und die präzise, heutzutage noch GUI-basierte CAD-Modellierung gegenüber. Es ist zu erwarten, dass diese Gegensätze in zukünftigen immersiven Modelliersystemen durch die Integration von Desktop-CAD-Funktionen (vgl. Stork, 2000) und insbesondere durch Methoden des maschinellen Lernens überbrückt werden (vgl. Zhang & Sun, 2007; Diehl et al., 2004). Letztere sind in der Lage, in freihändig erstellten Skizzen Objekte automatisch zu detektieren, zu parametrisieren und zu Objekthierarchien (z. B. Baugruppen) zusammen zu fassen. Anwender könnten so auf skizzierende Weise detaillierte Produktmodelle entwerfen,[1] ohne sich WIMP-basierter Interaktionstechniken bedienen zu müssen.

Zur Verbesserung der freihändigen Modellierung von Produktdetails können haptische Unterstützungsmethoden (vgl. Keefe et al., 2007) sowie hybride Modelliertechniken wie „digitales Granulat" (vgl. Piper et al., 2002) oder „virtueller Ton" (engl. virtual clay, vgl. Biahmou Tchebetchou, 2005) eingesetzt werden. Diese erlauben die Anwendung motorischer Fertigkeiten und intensivieren das Erleben der digitalen Modelliertätigkeit.

Schließlich sollte eine durchgängig anwendbare immersive Modelliermethode umfangreiche Möglichkeiten bieten, sämtliche produktbeschreibenden Informationen zu visualisieren und zwischen verschiedenen Produktsichten kontinuierlich zu wechseln. Hierdurch könnten die menschlichen Fähigkeiten zur visuellen Analyse effizienter genutzt und im Produktentwicklungsprozess eingebracht werden.

10.2.2 Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Im Rahmen dieser Arbeit sind mehrfach Implikationen für zukünftige Forschung und für Entwicklung entstanden, deren Bearbeitung sowohl die jeweiligen Disziplinen als auch das immersive Skizzieren als interdisziplinäres Forschungsthema wesentlich weiterentwickeln werden.

Forschungs- und Entwicklungsbedarf im Bereich des immersiven dreidimensionalen Skizzierens:

- Eine wesentliche Frage stellt sich hinsichtlich der Erlernbarkeit des immersives Skizzierens, d. h. die Frage, ob und wann sich Lerneffekte einstellen, und bis zu welchem Niveau sich Designer und Konstrukteure Fertigkeiten des immersive Skizzierens aneignen können. Diese Frage sollte zweifach untersucht werden. Zunächst sollten Fragen der sensumotorischen Kontrolle des immersiven Skizzierens untersucht werden, indem beispielsweise Objektprimitive (Kugeln, Würfel etc.) nachzuzeichnen sind, und deren Güte untersucht wird. Weiterhin sollten Langzeitstudien durchgeführt werden, die anhand objektiver Kriterien den Lernerfolg messen.

[1] Der mehrdeutige, assoziative und „unfertige" Charakter von Produktskizzen in frühen konzeptionellen Produktentwicklungsphasen (vgl. Buxton, 2007) sollte auch in einem durchgängigen immersiven Modelliersystem erhalten bleiben.

- Welche geeigneten haptischen Unterstützungsmethoden können entwickelt werden? Die bisherigen Vorschläge reichen von transparenten Scheiben als physischen Auflageflächen (vgl. Fiorentino et al., 2002a) bis hin zum Abbremsen der Zeichenbewegung durch Force-Feedback-Geräte für nicht-immersive Skizzieranwendungen (vgl. Keefe et al., 2007). Die Suche nach kreativen Lösungen zur Erleichterung der sensumotorischen Kontrolle des Skizzierwerkzeugs und zur Unterstützung von Detailzeichnungen in immersiven Umgebungen ist eine der größten Herausforderungen in diesem Forschungsfeld (vgl. Hinckley et al., 1994b).

- Das in den Studien dieser Arbeit genutzte Stiftwerkzeug sollte um weitere Modellierwerkzeuge ergänzt werden. Ein im Anhang 12.5.2 (S. 285) vorgestelltes beidhändiges Bezierwerkzeug ermöglicht eine rasche und einfache Modellierung von Bezierflächen, die bisher nur mittels herkömmlicher Desktop-CAD-Programme erstellt werden konnten (vgl. Wiese et al., 2009). Welche weiteren Tangible User Interfaces können gefunden werden, die physische Kontrollierbarkeit und CAD-Modellierungstechniken oder auch künstlerisch, kreative Modelliertechniken verbinden?

- Können aus bestehenden konventionellen Modellierwerkzeugen neue Ideen für hybride Modellierwerkzeuge abgeleitet werden?

- Mehrere Funktionen wurden wiederholt von den Teilnehmern der Studien gewünscht. Deren Umsetzung im Rahmen eines immersiven Skizziersystems können dessen Wirkungsgrad und Akzeptanz erheblich steigern:

    - Möglichkeiten zur Skalierung der dreidimensionalen Skizze, insbesondere für die Arbeit an geometrisch großen Modellen, bzw. um an Details zu arbeiten,

    - Möglichkeit der visuellen Stimulation durch Einblenden von Umgebungsbildern in der virtuellen Umgebung, beispielsweise Innenansichten existierender Räume,

    - Snap-Funktion zum automatischen Verbinden von Linienenden während des Skizzierens,

    - Einblenden eines dreidimensionalen Gitters zu Verbesserung der Entfernungsabschätzung,

    - Einsatz halbtransparenter Linien und Flächen, um während des Skizzierens jederzeit auch verdeckt liegende Objekte wahrnehmen, und in die Skizzierhandlung einbeziehen zu können; alternativ könnten beim linienbasierten immersiven Skizzieren zur Erhöhung der Übersichtlichkeit verdeckte Kanten von als Linienzeichnungen (Drahtgittermodellen) vorliegenden Objekten ausgeblendet werden (vgl. Müller, 2007)

    - Algorithmen zur Erstellung von Objekten anhand von Strichskizzen, die bereits erfolgreich in Desktop-basierten Lösungen eingesetzt werden (vgl. Igarashi et al., 1999; Nealen et al., 2007), sollten auf immersive Skizziersysteme übertragen werden. Dazu zählen auch Funktionen zur Korrektur und zum Überzeichnen (engl. *oversketching*) von Skizzeninhalten.

    - Weitere Ausbaumöglichkeiten finden sich im Kapitel 5 und im Anhang 12.1 (S. 274).

Forschungsbedarf im Bereich der methodischen Produktentwicklung:

- Um die Wirksamkeit von Unterstützungswerkzeugen für frühe konzeptionelle Produktentwicklungsphasen zuverlässig überprüfen zu können, müssen geeignete Methoden entwickelt werden, die die Lösungsgüte von Produktentwürfen schon in frühen Phasen quantifizierbar machen. Da in frühen Entwicklungsphasen in der Regel viele Entwürfe (beispielsweise Skizzen) erzeugt werden, müssen die Methoden eine schnelle Beurteilung dieser Entwürfe ermöglichen, damit diese in ökonomisch vertretbaren Zeiträumen erfolgen kann. Bisherige Methoden zur Beurteilung von alternativen Produktentwürfen (vgl. Zangemeister, 1973; Christiaans, 2002) sind auf frühe Entwürfe nicht anwendbar, da zu viele Kriterien nicht bestimmt werden können (beispielsweise können Funktions- und Wirkprinzip sowie ästhetische Eigenschaften nur schwer aus frühen Produktskizzen abgelesen werden).

- Der genannte Bedarf nach einer trennscharfen Bewertungsmethode zeigt sich insbesondere bei der Bewertung von dreidimensionalen Skizzen; hier besteht zusätzlich der Bedarf nach einer Methode, die es erlaubt, zweidimensional erstellte Papierskizzen und dreidimensionale Skizzen zur Bewertung in ein neutrales Vergleichssystem zu überführen.

- Eine Diskussion ethischer Konsequenzen eines zunehmenden Einsatzes immersiver Technologien auf Designer, Konstrukteure und auf Arbeitsgruppen ist wünschenswert, um eventuelle Risiken ggf. schon vor einer Markteinführung zu adressieren (vgl. u. a. Weizenbaum, 2001). Kritisch kann beispielsweise hinterfragt werden, ob durch die vermehrte Arbeit in virtuellen Umgebungen ein Verlust des Bezugs zur natürlichen Umgebung einhergeht. Diskussionswürdig ist auch, ob die Arbeit mit physischem Material weiter abnimmt und dadurch der Erwerb manueller Fertigkeiten erschwert wird. Im Kontext dieser Arbeit stellt sich insbesondere die Frage, ob die Entscheidungsfreiheit der Anwender beispielsweise über Fragen der Formgestaltung auf die vom technischen System vorgegebenen Grenzen eingeschränkt wird, oder ob durch virtuelle Technologien genau das Gegenteil, nämlich eine Erweiterung der schöpferischen Gestaltungsmöglichkeiten erreicht werden kann.

Forschungsbedarf im Bereich Mixed Reality/ Tangible User Interfaces/ Physicality:

- In dieser Arbeit wurden insbesondere die materiellen und räumlichen Eigenschaften von Tangible User Interfaces in virtuellen Umgebungen untersucht und positive Effekte der Kombination aufgezeigt. Unberücksichtigt blieben Fragen der Interaktion mit mehreren physischen Objekten und Fragen des aktiven Mappings eines physischen Objekts an ein virtuelles Objekt bzw. eine digitale Funktion durch den Anwender (attach, detach; vgl. Ullmer et al., 2005). Beide Fragen sollten in folgenden Studien untersucht werden, um das Unterstützungspotenzial durch TUIs in virtuellen Umgebungen weiter quantifizieren und verbessern zu können.

- Virtuelle Umgebungen sollten noch stärker als Möglichkeit begriffen werden, Tangible User Interfaces mit algorithmischer Mächtigkeit (engl. *computational power*) zu versehen. Die Möglichkeit der flexiblen Informationsausgabe in räumlicher Nähe zu physischen Objekten prädestiniert immersive Umgebungen dazu, Tangible User Interfaces um umfangreiche grafische Möglichkeiten zur Informationsausgabe anzureichern.

Forschungs- und Entwicklungsbedarf im Bereich Virtual Reality:

- Als zentrale Hindernisse für das immersive Skizzieren in Bezug auf dessen Kommunikation- und Kooperationsfunktionen hat sich die fehlende Teamunterstützung und Mehrbenutzerfähigkeit stereoskopischer immersiver VR-Systeme erwiesen.[1] Die Entwicklung mehrbenutzerfähiger Systeme, in denen ein einheitlicher Referenzraum für Zeigegesten geschaffen wird (deiktische Referenzialität), ist ein vorrangiges Ziel für den produktiven Einsatz immersiver Systeme. Im speziellen das immersive Skizzieren aber auch interaktive Design-Reviews und andere kooperative Tätigkeiten könnten damit durch VR-Technologien wesentlich stärker unterstützt werden.

- Als wesentliche Schwierigkeiten in Bezug auf die sensumotorische Koordination haben sich Ungenauigkeit und Latenz des Positionstrackings und der Akkommodations-Konvergenz-Konflikt heraus gestellt. Für Erstere sind Lösungen durch die fortschreitende Entwicklung optischer Trackingverfahren zu erwarten. Für die Lösung des Akkommodations-Konvergenz-Konflikts können Verfahren entwickelt werden, die den Fixationspunkt von der Projektionsfläche lösen und in den Greif- und Bewegungsraum des Anwenders verlagern (vgl. Fehn et al., 2006).

- Der Ansatz, Interaktionstechniken durch die Lösungsgüte von canonical manipulation tasks (CMT) zu beurteilen, sollte zugunsten eines breiteren Aufgabenspektrums erweitert und ggf. um anwendungsspezifische Aufgaben wie immersives Skizzieren, Modellieren, Kommunizieren etc. ergänzt werden. Die Konzentration auf CMT birgt die Gefahr, dass Potenziale übersehen werden, die durch eine aufgabenspezifische Gestaltung von Interaktionswerkzeugen erschlossen würden.

- Das empirisch abgesicherte Wissen um die basalen Unterstützungsfunktionen von VR-Technologien wie Stereoskopie, Interaktivität, Immersion etc. ist noch gering (vgl. gleichlautende Kritik bei Bowman et al., 2005). Hier gilt es im Sinne einer kumulierenden Forschung, eine solide Wissens- und Forschungsgrundlage zu schaffen, auf der Hypothesen zum Potenzial neuer VR-Technologien abgesichert formuliert und untersucht werden können.

---

[1] HMD-basierte VR-Systeme weisen diesen Nachteil zwar nicht auf, ihr Einsatz ist aufgrund ergonomischer Eigenschaften jedoch problematisch und stößt auf wenig Benutzerakzeptanz.

10.2.3 Schlusswort

Von der faszinierenden Idee des immersiven dreidimensionalen Skizzierens hin zur Entwicklung funktionaler Systeme für kreatives, produktives oder künstlerisches Arbeiten, sind bereits wesentliche Schritte vollzogen worden. Dass immersives Skizzieren ein selbstverständlicher Bestandteil des Methodenkanons der Virtuellen Produktentstehung werden sollte, kann auf Grundlage der Ergebnisse dieser Arbeit mit Nachdruck vertreten und befördert werden. Damit diese Systeme auch in ihren interaktiven Eigenschaften auf die Anwender zugeschnitten werden, ist ein konsequenter benutzer-zentrierte Entwicklungsprozess notwendig. Diese Arbeit sollte hierzu ein Beitrag sein.

Meine Bilder sind klüger als ich.

Gerhard Richter

(zit. n. Schreiber, 2005, S. 211)

11
Literatur

Albers, A. (1994) *Simultaneous Engineering, Projektmanagement und Konstruktionsmethodik - Werkzeuge zur Effizienzsteigerung. VDI-Berichte 1120*. Düsseldorf: VDI-Verlag.

Alkassar, A., Garschhammer, M., Gehring, F., Keil, P., Kelter, H., Löwer, U., Pankow, M., Sadeghi, A.-R., Schiffers, M., Ullmann, M. & Vogel, S. (2003) *Kommunikation- und Informationstechnik 2010+3. Neue Trends und Entwicklungen in Technologie, Anwendungen und Sicherheit*. Ingelheim SecuMedia Verlag.

Amabile, T. M. (1983) *The Social Psychology of Creativity*. New York, Heidelberg: Springer

Amelang, M. & Bartussek, D. (1997) *Differenzielle Psychologie und Persönlichkeitsforschung*. Aufl. 4. Stuttgart, Berlin, Köln: Kohlhammer.

Anderson, J. R. (1996) *Kognitive Psychologie*. Aufl. 2. Heidelberg: Spektrum, Akademischer Verlag.

Arsenault, R. & Ware, C. (2000) Eye-Hand Co-ordination with Force Feedback. In: *Tagungsband SIGCHI conference on Human factors in computing systems (CHI'00)*. The Hague, The Netherlands, ACM Press, 408-414.

Arsenault, R. & Ware, C. (2004) The Importance of Stereo and Eye-Coupled Perspective for Eye-Hand Coordination in Fish Tank VR. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* 13(5), 549-559.

Atkinson, J. W. & Shiffrin, R. M. (1968) Human Memory: A proposed system and its control processes. In: Spence, K. W. & Spence, J. T. (Hrsg.) *The psychology of learning and motivation: Advances in research and theory*. New York: Academic Press. Vol. 2, 89-195.

Autodesk. (2009) *Perfect your designs*. Zugriff am 29. August 2009 von http://images.autodesk.com/emea_dach_main_germany/files/aliassurface10_detail_bro_us.pdf.

Azuma, R., Baillot, Y., Behringer, R., Feiner, S., Julier, S. & MacIntyre, B. (2001) Recent Advances in Augmented Reality *Computer Graphics* 21(6), 34-47.

Bailey, B. & Konstan, J. (2003) Are Informal Tools Better? Comparing DEMAIS, Pencil and Paper, and Authorware for Early Multimedia Design. In: *Tagungsband CHI '03*. ACM Press, 313-320.

Baker, B. O., Hardyck, C. D. & Petrinovich, L. F. (1966) Weak measurement vs. strong statistics: An empirical critique of S. S. Stevens proscriptions of statistics. *Educational and Psychological Measurement* 26, 291-309.

Besemer, S. P. & O'Quin, K. (1999) Confirming the Three-Factor Creative Product Analysis Matrix Model in an American Sample. *Creativity Research Journal* 12(4), 287-296

Besermer, S. & O`Quin, K. (1986) Analyzing creative products: Refinement and test of a judging instrument. *The Journal of Creative Behaviour* 20(2), 115-126.

Besterfield, D. H. & O'Hagan, R. E. (2007) *Technical sketching with an introduction to 2D and 3D CAD: for engineers, technologists, and technicians.* Aufl. 4. Upper Saddle River, New Jersey: Pearson Prentice Hall, Inc.

Biahmou Tchebetchou, A. R. (2005) *Methoden für das Industriedesign in Virtueller Realität.* Dissertation, Berlin: TU Berlin.

Bimber, O. & Raskar, R. (2005) *Spatial Augmented Reality. Merging Real and Virtual Worlds.* Wellesley, Massachusetts, USA: A K Peters.

Birkhofer, H. (1994) Bild und Begriff im Ablauf einer realen Produktentwicklung. In: Ehrlenspiel, K., Ambrosy, S. & Günther, J. (Hrsg.) *Bild und Begriff I.* München: Technische Universität München. 14-23.

Bock, A. (1955) Die Begriffe „Konstruieren, Entwerfen und Gestalten". *Die Technik* 10, 504-505.

Boden, M. (2004) *The Creative Mind: Myths and Mechanisms.* Aufl. 2. London, New York: Routledge.

Bortz, J. (2005) *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler.* Aufl. 6. Heidelberg: Springer Medizin Verlag.

Bortz, J. & Döring, N. (2006) *Forschungsmethoden und Evaluation für Human- und Sozialwissenschaftler.* Aufl. 3. Berlin: Springer.

Bowman, D. A. & Hodges, L. F. (1997) An evaluation of techniques for grabbing and manipulating remote objects in immersive virtual environments. In: *Tagungsband Symposium on Interactive 3D graphics.* Providence, Rhode Island, USA, ACM Press, 35-38.

Bowman, D. A., Kruijff, E., LaViola Jr., J. J. & Poupyrev, I. (2004) *3D User Interfaces: Theory and Practice.* Reading, Massachusetts: Addison-Wesley.

Bowman, D. A., Kruijff, E., LaViola Jr., J. J. & Poupyrev, I. (2005) *3D User Interfaces: Theory and Practice.* Reading, Massachusetts: Addison-Wesley.

Brau, H., Ullmann, C., Duthweiler, M. & Schulze, H. (2005) Gestaltung von Augmented Reality Applikationen für Kommissionieraufgaben. In: Urbas, L. & Steffens, C. (Hrsg.) *Tagungsband Zustandserkennung und Systemgestaltung - 6. Berliner Werkstatt Mensch-Maschine-Systeme (ZMMS Spektrum Band 19).* Berlin, VDI Verlag.

Brauer, W. (1968) Zur numerischen Erfassung geometrischer Formen, die hierzu notwendigen Vorraussetzungen und erste Komplexe der Anwendung. *Die Technik* 23(5), 311-316.

Breen, D. E., Whitaker, R. T., Rose, E. & Tuceryan, M. (1996) Interactive Occlusion and Automatic Object Placement for Augmented Reality. *Computer Graphics Forum* 15(3), 11-22.

Brown, D. C. (2008) Guiding computational design creativity research. In: *Tagungsband NSF International Workshop on Studying Design Creativity '08.* University of Provence, France.

Burdea, G. & Coiffet, P. (1994) *Virtual Reality Technology.* New York: John Wiley & Sons, Inc.

Buxton, W. (1983) Lexical and Pragmatic Considerations of Input Structures. *Computer Graphics* 17(1), 31-37.

Buxton, W. (1994) Two-handed document navigation. *XEROX Disclosure Journal* 19(2), 103-108.

Buxton, W. (2002) *Human Input to Computer Systems: Theories, Techniques and Technology.* (unpublished book manuscript).

Buxton, W. (2007) *Sketching User Experiences: Getting the Design Right and the Right Design.* Aufl. im Druck. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers.

Christiaans, H. H. C. M. (1992) *Creativity in Design.*Delft: Technische Univeriteit Delft.

Christiaans, H. H. C. M. (2002) Creativity as a Design Criterion. *Creativity Research Journal* 14(1), 41-54.

Congedo, M., Lécuyer, A. & Gentaz, E. (2006) The influence of spatial delocation on perceptual integration of vision and touch. *Presence* 15(3), 353 - 357.

Cook, M. T. & Agah, A. (2009) A Survey of Sketch-Based 3-Dimensional Modeling Techniques. *Interacting with Computers*, doi: 10.1016/j.intcom.2009.05.004.

Cruz-Neira, C., Sandin, D. J., DeFanti, T. A., R.V., K. & Hart, J. C. (1992) The CAVE: audio visual experience automatic virtual environment. *Communications of the ACM* 35(6), 64-72.

Cunningham, D. W., Billock, V. A. & Tsou, B. H. (2001) Sensorimotor adaptation to violations of temporal contiguity. *Psychological Science* 12(6), 532-535.

Daimler-AG. (2006) *Der Design-Prozess: Arbeit in zwei Welten.* Zugriff am 10.08.2008 von http://media.daimler.com.

Daimler-AG (2008a) Auf der kreativen Insel. *HighTechReport HTR* 2008(1), 12-23.

Daimler-AG. (2008b, 15.7.2008) *Tools und Techniken im Design – vom Schreibtisch in die CAVE.* HighTechReport HTR. Zugriff am 15.7.2008 von http://www.daimler.com/dccom/0-5-1059924-49-1066208-1-0-0-1063003-0-0-135-7165-0-0-0-0-0-0-0.html.

De Amicis, R., Conti, G. & Fiorentino, M. (2004) Tangible interfaces in virtual environments for industrial design. In: *Tagungsband Working conference on Advanced visual interfaces (AVI).* Gallipoli. Italy, ACM Press, 261-264.

Deisinger, J. (2002) *Entwicklung eines hybriden Modelliersystems zur immersiven konzeptionellen Formgestaltung.* Dissertation, Stuttgart: Universität Stuttgart.

Deisinger, J., Blach, R., Wesche, M., Breining, R. & Simon, A. (2000) Towards immersive modeling - Challenges and recommendations. A workshop analyzing the needs of designers. In: Mulder, J. D. & Liere van, R. (Hrsg.) *Tagungsband Eurographics Workshop on Virtual Environments EGVE'00.* Amsterdam, European Association for Computer Graphics EUROGRAPHICS, 145-176.

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. (Hrsg.) *Tagungsband Eurographics Workshop on Sketch-Based Interfaces and Modeling (SBIM).* Aire-la-Ville, Eurographics Association, 137-142.

Diggle, P. J., Liang, K.-Y. & Zeger, S. L. (1994) *The Analysis of Longitudinal Data* Aufl. 2. Oxford: Clarendon Press.

DIN 199-1 (2002) *Technische Produktdokumentation - CAD-Modelle, Zeichnungen und Stücklisten - Teil 1: Begriffe.* Berlin, Wien, Zürich: Beuth.

DIN EN ISO 8373 (1996) *Industrieroboter - Wörterbuch (ISO 8373:1994); Deutsche Fassung EN ISO 8373:1996.* Berlin, Wien, Zürich: Beuth.

DIN EN ISO 9241-110 (2006) *Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 110: Grundsätze der Dialoggestaltung (ISO 9241-110:2006); Deutsche Fassung EN ISO 9241-110:2006.* Berlin, Wien, Zürich: Beuth.

DIN EN ISO 13407 (2000) *Benutzer-orientierte Gestaltung interaktiver Systeme (ISO 13407:1999); Deutsche Fassung EN ISO 13407:1999.* Berlin, Wien, Zürich: Beuth.

Dix, A. (2006) First Steps in Physicality. In: Ghazali, M., Ramduny-Ellis, D., Hornecker, E. & Dix, A. (Hrsg.) *Tagungsband First International Workshop on Physicality.* Lancester University, II-V.

Dodds, R. A., Ward, T. B. & Smith, S. M. (2004) A review of the experimental literature on incubation in problem solving and creativity. In: Runco, M. A. (Hrsg.) *Creativity research handbook.* Cresskill, NJ: Hampton Press. Vol. 3.

Dörner, D. (1979) *Problemlösen als Informationsverarbeitung.* Aufl. 2. Stuttgart: Kohlhammer.

Dörner, D. (1999) Kreativität, Motivation und Emotion. In: Zimmermann, B. (Hrsg.) *Tagungsband Interdisziplinären Symposium Kreatives Denken und Innovationen in mathematischen Wissenschaften.* Jena, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Fakultät für Mathematik und Informatik, Abteilung Didaktik, 29-54.

Dourish, P. (2001) *Where the Action Is: The Foundations of Embodied Interaction.* Cambridge: MIT Press.

Drascic, D. & Milgram, P. (1996) Perceptual issues in augmented reality. *SPIE Stereoscopic Displays and Applications VII, Virtual Reality Systems III* 2653, 123–134.

Dürrenberger, G. & Behringer, J. (1999) *Die Fokusgruppe in Theorie und Anwendung.* Stuttgart: Akademie für Technikfolgenabschätzung in Baden-Württemberg.

Dylla, N. (1991) *Denk- und Handlungsmuster beim Konstruieren.* München: Technische Universität München.

Easton, R. D., Greene, A. J. & Srinivas, K. (1997) Transfer between vision and haptics: Memory for 2-D patterns and 3-D objects. *Psychonomic Bulletin and Review* 4(3), 403-410.

Ehrlenspiel, K. (1994) Untersuchung individueller Konstruktionsprozesse. In: Pahl, G. (Hrsg.) *Psychologische und pädagogische Fragen beim methodischen Konstruieren: Ergenisse des Ladenberger Disukurses von Mai 1992 bis Oktober 1993.* Köln: Verlag TÜV Rheinland. 43-57.

Ehrlenspiel, K. (1995) *Integrierte Produktentwicklung: Methoden für Prozessorganisation, Produkterstellung und Konstruktion.* München, WIe: Carl Hanser Verlag.

Elbert, T., Pantev, C., Wienbruch, C., Rockstroh, B. & Taub, E. (1995) Increased cortical representation of the finders of the left hand in string players. *Science* 270, 305-307.

Ernst, M. O. (2000) *Psychophysikalische Untersuchungen zur visuomotorischen Integration beim Menschen: visuelle und haptische Wahrnehmung virtueller und realer Objekte.*Tübingen: Universität Tübingen.

Ernst, M. O. & Banks, M. S. (2002) Humans integrate visual and haptic information in a statistically optimal fashion. *Nature* 415, 429-433.

Ernst, M. O. & Lange, C. (2007) Multisensory Recognition of Actively Explored Objects. *Canadian Journal of Experimental Psychology* 61(3), 242-253.

Fahrmeir, L., Kneib, T. & Lang, S. (2007) *Regression. Modelle, Methoden und Anwendungen.* Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.

Fehn, C., de la Barré, R. & Pastoor, S. (2006) Interactive 3-DTV-Concepts and Key Technologies. *Proceedings of the IEEE* 94(3), 524-538.

Ferguson, E. S. (1993) *Das innere Auge - Von der Kunst des Ingenieurs.* Basel: Birkhäuser.

Fiorentino, M., de Amicis, R., Stork, A. & Monno, G. (2002a) Spacedesign: A Mixed Reality Workspace for Aesthetic Industrial Design. In: *Tagungsband International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR).* Washington, DC, IEEE Computer Society, 86–94.

Fiorentino, M., de Amicis, R., Stork, A. & Monno, G. (2002b) Surface Design In Virtual Reality As Industrial Application. In: *Tagungsband DESIGN Conference.* Dubrovnik, Croatia, 477-482.

Fish, J. & Scrivener, S. (1990) Amplifying the mind's eye: Sketching and visual cognition. *Leonardo* 23(1), 117-126.

Fitts, P. M. (1951) *Human Engineering for an Effective Air-navigation and Traffic-control System.* Columbus, OH: National Research Council, Division of Anthropology and Psychology, Committee on Aviation Psychology.

Fitts, P. M. (1954) The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology* 47(6), 381-391.

Fitzmaurice, G. (1996) *Graspable User Interfaces.*Toronto: University of Toronto.

Fitzmaurice, G. & Buxton, W. (1997) An Empirical Evaluation of Graspable User Interfaces: Towards Specialized, Space-Multiplexed Input. In: *Tagungsband CHI.* ACM Press, 43-50.

Fitzmaurice, G., Ishii, H. & Buxton, W. (1995) Bricks: Laying the Foundations for Graspable User Interfaces. In: *Tagungsband SIGCHI conference on Human factors in computing systems (CHI'95).* Denver, Colorado, United States, ACM Press, 442–449.

Fleisch, T., Gino, B., Pedro, S. & Stork, A. (2004) Stroke-Input Methods for Immersive Styling Environments. In: *Tagungsband IEEE Shape Modeling International 2004 (SMI'04).* IEEE Computer Society, 275-283.

Flemisch, F. O. (2004) Was kommt nach User Centered Design? Skizze auf der Suche nach Leitmotiven für das Entwerfen und Gestalten. In: Steffens, C., Thüring, M. & Urbas, L. (Hrsg.) *Tagungsband 5. Berliner Werkstatt Mensch-Maschine-Systeme BWMMS'05: Entwerfen und Gestalten.* Berlin, VDI-Verlag, 69-87.

Foley, J. D. & van Dam, A. (1982) *Fundamentals of Computer Graphics.* Reading, Mass: Addison-Wesley.

Fox, J. (2002) *Linear Mixed Models.* Zugriff am 15.08.2008 von http://cran.r-project.org/doc/contrib/Fox-Companion/appendix-mixed-models.pdf.

Friedmann, F., Raymond, B. A. & Feldhusen, J. F. (1978) The effects of environmental scanning on creativity. *Gifted Child Quaterly* 22, 248-251.

Fromm, E. (1959) The Creative Attitude. In: Anderson, H. H. (Hrsg.) *Creativity and Its Cultivation*. New York: Harper and Brothers. 44-54.

Frontdesign. (2006) *Sketch furniture by Front*. Zugriff am 30. Jul. von http://www.youtube.com/watch?v=8zP1em1dg5k.

Gabora, L. (2002) Cognitive Mechanisms Underlying the Creative Process. In: *Tagungsband Creativity & Cognition*. Loughborough, UK, ACM Press, 126-133.

Galperin, P. J. (1966) Die geistige Handlung als Grundlage für die Bildung von Gedanken und Vorstellungen. In: Kassokowski, A. & Lompscher, J. (Hrsg.) *Probleme der Lerntheorie*. Berlin: Volk und Wissen. 33-49.

Galperin, P. J. & Talysina, N. F. (1966) Die Bildung erster geometrischer Begriffe auf der Grundlage organisierter Handlung der Schüler. In: Kassokowski, A. & Lompscher, J. (Hrsg.) *Probleme der Lerntheorie*. Berlin: Volk und Wissen. 106-130.

Garson, D. (2008) *Linear Mixed Models. Random Effects, Hierarchical Linear, Multilevel, Random Coefficients, and Repeated Measures Models*. Zugriff am 02.01.2009 von http://faculty.chass.ncsu.edu/garson/PA765/multilevel.htm.

Gibson, J. J. (1962) Obsevations on active touch. *Psychology Review* 69, 477-491.

Gibson, J. J. (1979) *The ecological approach to visual perception*. Boston: Houghton Mifflin.

Gibson, J. J. (1982) *Die Sinne und der Prozeß der Wahrnehmung*. Aufl. 2. Bern, Stuttagart, Wien: Huber.

Gittler, G. (1990) *Dreidimensionaler Würfeltest (3DW)*. Weinheim: Beltz.

Gjerlufsen, T. & Olsen, J. W. (2007) Physicality and Digitality: Parallelisms at a Materal Level. In: Ramduny-Ellis, D., Dix, A., Hare, J. & Gill, S. (Hrsg.) *Tagungsband Physicality 2007*. Lancester University, UWIC Press, 93-98.

Goldstein, E. B., Hrsg. (2008) *Wahrnehmungspsychologie*. Aufl. 7. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.

Görner, R. (1973) Ergebnisse und Probleme aus empirischen psychologischen Untersuchungen der Konstrukteurstätigkeit. In: *Tagungsband 8. Symposium „Methoden und Mittel zur Rationalisierung der Konstruktionsarbeit"*. Dresden, TU Dresden, Sektion Elektrotechnologie und Feingerätetechnik.

Green, D. M. & Swets, J. A. (1966) *Signal Detection Theory and Psychophysics*. New York: Wiley.

Greenlee, M. W. (2002) Sehen, visuelle Aufmerksamkeit. In: Elbert, T. & Birbaumer, N. (Hrsg.) *Biologische Grundlagen der Psychologie*. Göttingen, Bern, Toronto, Seattle: Hogrefe-Verlag. 125-247.

Guilford, J. P. (1959) *Personality*. New York: McGraw Hill.

Guilford, J. P. (1967) *The nature of human intelligence*. New York: MacGraw Hill.

Haase, R. F. (1983) Classical and Partial Eta Square in Multifactor ANOVA Designs. *Educational and Psychological Measurement* 43(35), 35-39.

Hacker, W. (1973) *Allgemeine Arbeits- und Ingenieurspsychologie*. Berlin: Deutscher Verlag der Wissenschaften.

Hacker, W. (1989) On the utility of procedural rules. *Ergonomics* 32(7), 717-732.

Hacker, W. (1994) Zur Struktur von Handlungswissen bei Entwurfstätigkeiten. In: Pahl, G. (Hrsg.) *Psychologische und pädagogische Fragen beim methodischen Konstruieren: Ergenisse des Ladenberger Disukurses von Mai 1992 bis Oktober 1993.* Köln: Verlag TÜV Rheinland. 161-175.

Hacker, W. (1995) Konstruieren als Handeln - Bild : Begriff = Zeichen : Denken? (Vortrag beim Werkstattgespräch "Bild und Begriff I" an der Technische Universität München, Februar 1994). In: Hacker, W. (Hrsg.) *Psychologie des Konstruierens.* Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für Allgemeine Psychologie und Methoden der Psychologie. Vol. Forschungsbericht 22, II / 1-10.

Hacker, W. (1998) *Allgemeine Arbeitspsychologie.* Bern.: Huber.

Hacker, W. (1999) Konstruktives Entwickeln als Tätigkeit – Versuch einer Reinterpretation des Entwurfsdenkens (design problem solving). *Sprache & Kognition* 18(3,4), 88 – 97.

Hacker, W. (2002) Konstruktives Entwickeln: Psychologische Grundlagen. In: Hacker, W. (Hrsg.) *Denken in der Produktentwicklung. Psychologische Unterstützung in den frühen Phasen.* München: vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, Rainer Hampp Verlag. Vol. 33, 11-25.

Hacker, W. (2007) Innovationsmanagement der frühen Phasen der Produktentwicklung: Stärkung des "intellektuellen Kapitals" (Beilage zum Tagungsband). In: *Tagungsband XII. Internationales Produktionstechnisches Kolloquium (PTK 2007): Nachhaltigkeit in der Produktionswirtschaft, Erfolgreich produzieren im globalen Umfeld.* Berlin, Fraunhofer IPK, 121 (Abstract), 1-8 (Beilage).

Hagen, W. (2005) Was ist ein Medium? Eine medien-epistemologische Fußnote. In: Roesler, A. & Münker, S. (Hrsg.) *Tagungsband Was ist ein Medium?* Weimar, Kolleg Friedrich Nietzsche.

Haller, M., Drab, S., Hartmann, W. & Zauner, J. (2003) A Real-time Shadow Approach for an Augmented Reality Application using Shadow Volumes. In: *Tagungsband ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology (VRST'03).* ACM Press, 56–65.

Hassenzahl, M. (2004) The Interplay of Beauty, Goodness and Usability in Interactive Products. *Human-Computer Interaction* 19, 319-349.

Hassenzahl, M., Burmeister, M. & Koller, F. (2003) AttrakDiff: Ein Fragebogen zur Messung wahrgenommener hedonischer und pragmatischer Qualität. In: Ziegler, J. & Szwillus, G. (Hrsg.) *Tagungsband Mensch & Computer 2003: Interaktion in Bewegung.* Stuttgart, B. G. Teubner, 187–196.

Heers, R. (2006) *Just Use It! Innovatives User Interface Design durch effektive Kreativitätstechniken.* Göttingen: Cuvillier Verlag.

Heidegger, M. (1927) Sein und Zeit. In: Husserl, E. (Hrsg.) *Jahrbuch für Philosophie und phänomenologische Forschung.* Tübingen: Neomarius.

Heilig, M. L. (1962) *Sensorama simulator.* Patent, Nr. 3050870, United States Patent and Trademark Office.

Hekkert, P. & Leder, H. (2008) Product Aesthetics. In: Schifferstein, H. N. J. & Hekkert, P. (Hrsg.) *Product Experience.* San Diego: Elsevier. 259-285.

Hennessey, B. A. & Amabile, T. M. (1988) The conditions of creativity. In: Sternberg, R. J. (Hrsg.) *The nature of creativity.* Cambridge: Cambridge University Press.

Heuser, K. C. (1994) *Freihändig zeichnen und skizzieren: Lehr- und Übungsbuch.* Augsburg: Augustus-Verlag.

Hinckley, K., Pausch, R., Gobble, J. & Kassell, N. (1994a) Passive real-world interface props for neurosurgical visualization. In: *Tagungsband CHI'94.* ACM Press, 452–458.

Hinckley, K., Pausch, R., Goblel, J. C. & Kassell, N. (1994b) A Survey of Design Issues in Spatial Input. In: *Tagungsband User Interfaces Software and Technology (UIST'94).* Marina del Rey, California, ACM Press, 213-222.

Hinkley, K. (2003) Input Technologies and Techniques. In: Jacko, J. A. & Sears, A. (Hrsg.) *The human-computer interaction handbook: fundamentals, evolving technologies and emerging applications.* Mahwah, New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates, Inc., Publishers. 151-168.

Hornecker, E. (2007a) Physical Affordances Considered Harmful !? In: Ramduny-Ellis, D., Dix, A., Hare, J. & Gill, S. (Hrsg.) *Tagungsband Second International Workshop on Physicality.* Lancester University, 15-20.

Hornecker, E. (2007b) Sketches, Drawings, Diagrams, Physical Models, Prototypes, and Gesture as Representational Forms. In: Ramduny-Ellis, D., Dix, A., Hare, J. & Gill, S. (Hrsg.) *Tagungsband Second International Workshop on Physicality.* Lancester University, 89-92.

Hornecker, E. & Buur, J. (2006) Getting a Grip on Tangible Interaction: A Framework on Physical Space and Social Interaction. In: *Tagungsband CHI 2006.* ACM Press, 437–446.

Howlett, S., Lee, R. & O'Sullivan, C. (2005) A framework for comparing task performance in real and virtual scenes. In: *Tagungsband Applied Perception in Graphics and Visualisation (APGV '05).* ACM Press, 119–122.

Hummels, C., Djajadiningrat, T. & Overbecke, K. (2001) Knowing, doing and feeling: Communication with your digital product. In: *Tagungsband Interdisziplinäres Kolleg Kognitions- und Neurowissenschaften.* Günne am Möhnesee, 289-308.

Hummels, C. C. M. (2000) *Gestural design tools: prototypes, experiments and scenarios.*Delft: University of Technology.

Hurtienne, J., Israel, J. H. & Weber, K. (2008) Cooking up Real World Business Applications Combining Physicality, Digitality, and Image Schemas. In: Schmidt, A., Gellersen, H., Hoven, E. v. d.et al. (Hrsg.) *Tagungsband TEI'08 Second International Conference on Tangible and Embedded Interaction.* Bonn, ACM Press, 239-246.

Hwang, T. S. & Ullman, D. G. (1990) The design capture system - capturing back of the envelope sketches. *Jounal of Engineering Design* 1(4), 339-353.

Igarashi, T., Matsuoka, S. & Tanaka, H. (1999) Teddy: A Sketching Interface for 3D Freeform Design. In: *Tagungsband SIGGRAPH '99.* ACM Press.

Immersion-Corp. (2005) *3D-Interaction product line.* Zugriff am 05.09.2005 von http://www.immersion.com/3d/.

Inami, M., Kawakami, N., Sekiguchi, D., Yanagida, Y., Maeda, T. & Tachi, S. (2000) Visuo-Haptic Display Using Head-Mounted Projector. In: *Tagungsband IEEE Virtual Reality 2000 Conference.* Los Alamitos, California, USA, IEEE Computer Society, 233-240.

Insko, B. E. (2001) *Passive Haptics Significantly Enhances Virtual Environments.*Chapel Hill: University of North Carolina.

Interrante, V., Ries, B. & Anderson, L. (2006) Distance Perception in Immersive Virtual Environments, Revisited. In: *Tagungsband IEEE Virtual Reality Conference (VR 2006).* Alexandria, Virginia, USA., ACM Press, 3-10.

Intons-Peterson, M. J. (1993) Imagery's role in creativity and discovery. In: Roskos-Ewoldsen, B., Intons-Peterson, M. J. & Anderson, R. E. (Hrsg.) *Imagery, creativity, and discovery.* Amsterdam: North-Holland. 1-37.

Ishii, H. & Ullmer, B. (1997) Tangible bits: towards seamless interfaces between people, bits, and atoms. In: *Tagungsband CHI'97.* Atlanta, Georgia, 234-241.

ISO-10303 (1994) *Industrial automation systems and integration - Product data representation and exchange - Part 1: Overview and fundamental principles.* Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization (ISO).

Israel, J. H., Hurtienne, J., Pohlmeyer, A. E., Mohs, C., Kindsmüller, M. C. & Naumann, A. (2009) On intuitive use, physicality and tangible user interfaces. *Int. Journal Arts and Technology* 2(4), 348-366.

Iwata, H. (2003) Haptic Interfaces. In: Jacko, J. A. & Sears, A. (Hrsg.) *The human-computer interaction handbook: fundamentals, evolving technologies and emerging applications.* Mahwah, New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates, Inc., Publishers. 206-219.

Jacob, R. J. K. (1990) What You Look At Is What You Get: Eye Movement-Based Interaction Techniques. In: *Tagungsband SIGCHI conference on Human factors in computing systems: Empowering people (CHI'90).* Seattle, Washington, United States ACM Press, 11-18.

Jacob, R. J. K., Girouard, A., Hirshfield, L. M., Horn, M. S., Shaer, O., Solovey, E. T. & Zigelbaum, J. (2008) Reality-Based Interaction: A Framework for Post-WIMP Interfaces. In: *Tagungsband CHI.* Florenz, Italien, ACM Press, 201-210.

Jacob, R. J. K., Ishii, H., Pangaro, G. & Patten, J. (2002) Hands-On Interfaces: A tangible interface for organizing information using a grid. In: *Tagungsband Conference on Human Factors in Computing Systems CHI'02.* Minneapolis, Minnesota, USA ACM Press, 339-346.

James, T. W., Kim, S. & Fisher, J. S. (2007) The Neural Basis of Haptic Object Processing. *Canadian Journal of Experimental Psychology* 61(3), 219-229.

Johannsen, G. (1993) *Mensch-Maschine-Systeme.* Berlin: Springer-Verlag.

Johnson, G., Gross, M. D., Hong, J. & Do, E. Y.-L. (2009) Computational Support for Sketching in Design: A Review. *Foundations and Trends in Human–Computer Interaction* 2(1), 1–93.

Just, M. A. & Carpenter, P. A. (1976) Eye fixations and cognitive processes. *Cognitive Psychology* 8, 441-480.

Karwowski, W. (2006) *International Encyclopedia of Ergonomics and Human Factors.* Boca Raton, New York, London, Tokyo: CRC Press.

Keefe, D. F., Acevedo Feliz, D., Moscovich, T., Laidlaw, D. H. & LaViola, J. (2001) CavePainting: A Fully Immersive 3D Artistic Medium and Interactive Experience. In: *Tagungsband ACM Symposium on Interactive 3D Graphics (SI3D'01).* ACM Press, 85-93.

Keefe, D. F., Zeleznik, R. C. & Laidlaw, D. H. (2007) Drawing On Air: Input Techniques for Controlled 3D Line Illustration. *IEEE Transactions of Visualization and Computer Graphics (TVCG)* 13(5), 1067-1080.

Kehler, T. (1998) *Designintegrierte Produktplanung und Produktkonzeption.* Dissertation, Berlin: Technische Universtiät Berlin.

Kitamura, Y., Ogata, S. & Kishino, F. (2002) A Manipulation Environment of Virtual and Real Objects using a Magnetic Metaphor. In: *Tagungsband ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology (VRST).* Monterey, CA, USA, ACM Press, 201–207.

Knauer, R. (2008) *Transformation. Grundlagen und Methodik des Gestaltens.* Basel, Boston, Berlin: Birkhäuser.

Knöpfle, C. (2003) *Intuitive und Immersive Interaktion für Virtuelle Umgebungen am Beispiel von VR Design Review.* Dissertation, Darmstadt: Technische Universität Darmstadt.

Koppelmann, U. (1993) *Produktmarketing.* Aufl. 4. Berlin: Springer Verlag.

Kosslyn, S. M. (1980) *Image and Mind.* Cambridge, MA: Harvard University Press.

Kosslyn, S. M. (1994a) *Image and Brain: The Resolution of the Imagery Debate.* Cambridge: MIT Press.

Kosslyn, S. M. (1994b) Visual Mental Images in the Brain: Current Issues. In: J. Farah, M. & Ratcliff, G. (Hrsg.) *The Neuropsychology of High-level Vision: Collected Tutorial Essays.* Hillsday, Hove: Lawrence Erlbaum Associates. 269-296.

Kosslyn, S. M. (1995) Mental Imagery. In: Kosslyn, S. M. & Osherson, D. N. (Hrsg.) *An invitation to cognitive science: Visual cognition and action.* Aufl. 2. Cambridge: MIT Press. Vol. 2, 267-296.

Kosslyn, S. M., Ganis, G. & Thompson, W. L. (2001) Neural foundations of imagery. *Nature Reviews Neuroscience* 2, 635-642.

Kosslyn, S. M. & Pomerantz, I. R. (1977) Imagery, propositions, and the form of internal representations. *Cognitive Psychology* 9, 52-76.

Krause, F.-L., Franke, H.-J. & Gausemeier, J. (2007) *Innovationspotentiale in der Produktentwicklung.* München, Wien: Carl Hanser Verlag.

Krause, F.-L., Israel, J. H., Neumann, J. & Beckmann-Dobrev, B. (2005) A 6-DOF User Interface for Grasping in VR-based Computer Aided Styling and Design. In: *Tagungsband ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology (VRST).* Monterey, CA, USA, ACM Press, 110–112.

Krause, F.-L., Jansen, H. & Langenberg, D. (2004) Potenziale der Virtualisierung für eine verbesserte Produktentstehung. In: *Tagungsband XI. Internationales Produktionstechnisches Kolloquium (PTK 2004): Innovative Vernunft - Ein kritischer Diskurs über die Zukunft der Produktionswirtschaft.* Berlin, Fraunhofer IPK, 75-91.

Krause, F.-L., Kimura, F., Kjelberg, T. & Lu, S. C.-Y. (1993) Product Modelling. In: *CIRP Annals 1993, Manufacturing Technology.* Bern, Stuttgart: Hallwag Publishers. 695-706.

Krause, F.-L. & Lüddemann, J. (1996) Virtual clay modelling. In: *Tagungsband 5th IFIP WG5.2 Workshop on Geometrical Modeling in Computer-Aided Design.* Airlie, Virginia, International Federation for Information Processing IFIP, 162-175.

Krippendorf, K. (1986) *Information Theory. Structural Models for Qualitative Data.* Beverly Hills: Sage.

Kronfeldner, M. E. (2005) Zum Begriff der psychologischen Kreativität als Basis einer naturalistischen Kreativitätstheorie: eine kompatibilistische Rekonstruktion von Originalität und Spontaneität. In: Abel, G. (Hrsg.) *Tagungsband Kreativität. XX. Deutscher Kongress für Philosophie.* Berlin, Universitätsverlag der TU Berlin, 19-30.

Krueger, R. A. & Casey, M. A. (2000) *Focus groups - a practical guide for applied research.* Aufl. 3. Thousand Oaks: Sage Publications.

Kurillo, G., Mihelj, M., Munih, M. & Bajd, T. (2005) Grasping and manipulation in virtual environment using 3By6 finger device. In: *Tagungsband 9th International Conference on Rehabilitation Robotics, 2005. ICORR 2005.* 131-134.

La Greca, A. M. (1980) Can children remember to be creative? An interview study of children's thinking process. *Child Development* 51, 572-575.

Laramee, R. S. & Ware, C. (2002) Binocular Rivalry and Interference with a Head Mounted Display. *ACM Transactions on Computer Human Interaction* 9(3), 1-14.

Laseau, P. (1980) *Graphic Thinking for Architects and Designers.* New York: Vaan Nostrand Reinhold.

LaViola, J. J. J. (2000) A Discussion of Cybersickness in Virtual Environments. *SIGCHI Bulletin* 21(1), 47-56.

Lederman, S. J. & Klatzky, R. L. (1987) Hand movements: A window into haptic object recognition. *Cognitive Psychology* 19, 421-459.

Lee, G. A., Kim, G. J. & Billinghurst, M. (2005) What you eXperience Is What You Get. *Communications of the ACM* 48, 76-81.

Lepetit, V. & Berger, M.-O. (2000) Handling Occlusions in Augmented Reality Systems: A Semi-Automatic Method. In: *Tagungsband IEEE and ACM International Symposium on Augmented Reality.* Munich, Germany, 137-146.

Levitin, D. J., MacLean, K., Mathews, M. & Chu, L. (2000) The Perception of Cross-Modal Simultaneity. In: *Tagungsband Computing Anticipatory Systems CASYS'99. Third International Conference. AIP Conference Proceedings.* Liege, Belgien, American Institute of Physics, 323-329

Lindemann, U., Müller, F., Pache, M. & Schneider, S. (2002) Der 3D-Skizzierer - Unscharfes digitales Skizzieren in einer Virtual Reality Umgebung. In: Szwillus, G. & Ziegler, J. (Hrsg.) *Tagungsband Mensch & Computer 2003: Interaktion in Bewegung.* Stuttgart, B. G. Teubner, 411-412.

Lippardt, S. (2000) *Gezielte Förderung der Kreativität durch bildliche Produktmodelle.* Düsseldorf: VDI Verlag.

Liu, J., Pastoor, S., Seifert, K. & Hurtienne, J. (2000) Three-dimensional PC: toward novel forms of human-computer interaction. In: *Tagungsband Three-Dimensional Video and Display: Devices and Systems SPIE CR76, Nov.* 5-8.

Lok, B. C. (2004) Towards the merging of real and virtual spaces. *Communications of the ACM* 47(8), 48-53.

Lok, B. C., Naik, S., Whitton, M. & Brooks, F. P. (2004) Experiences in Extemporaneous Incorporation of Real Objects in Immersive Virtual Environments. In: Froehlich, B., Kitamura, Y. & Bowman, D. (Hrsg.) *Tagungsband Beyond*

Wand and Glove Based Interaction, IEEE Virtual Reality 2004 (VR'04) Workshop. Chicago, Illinois, USA, 107-110.

Luczak, H., Rötting, M. & Oehme, O. (2003) Visual Displays. In: Jacko, J. A. & Sears, A. (Hrsg.) *The human-computer interaction handbook: fundamentals, evolving technologies and emerging applications.* Mahwah, New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates, Inc., Publishers. 187-205.

Lüddemann, J. (1996) *Virtuelle Tonmodellierung zur skizzierenden Formgestaltung im Industriedesign.* Dissertation, Berlin: Technische Universität Berlin.

Luria, A. R. & Vygotsky, L. S. (1992) *Ape, primitive man, and child: Essays in the history of behaviour.* Hemel Hempstead: Harvester Wheatsheaf.

MacKenzie, I. S. (2003) Motor Behavior Models for Human-Computer Interaction. In: Carroll, J. M. (Hrsg.) *HCI models, theories, and frameworks: Toward a multidisciplinary science of human-computer interaction.* San Francisco: Morgan Kaufmann. 27-54.

MacKenzie, I. S. & Ware, C. (1993) Lag as a determinant of human performance in interactive systems. In: *Tagungsband INTERCHI '93.* Amsterdam, ACM Press, 488-493.

Mahlke, S. (2008) *User Experience of Interaction with Technical Systems. Theories, methods, empirical results, and their application to the development of interactive systems.* Dissertation, Berlin: Technische Universität Berlin.

Mäkelä, W. & Ilmonen, T. (2004) Drawing, Painting and Sculpting in the Air. Development Studies about an Immersive Free-Hand Interface for Artists. In: *Tagungsband IEEE VR 2004 Workshop.* 89-92.

Mäkelä, W., Reunanen, M. & Takala, T. (2002) Possibilities and Limitations of Immersive FreeHand Expression: a Case Study with Professional Artists. In: *Tagungsband ACM Multimedia Conference MM'04.* New York, ACM Press, 504-507.

Marr, D. (1982) *Vision.* San Francisco: W. H. Freeman.

Mayhew, D. J. (1999) *The usability engineering lifecycle: a practitioner's handbook for user interface design.* San Francisco, Calif.: Morgan Kaufmann Publishers.

Mayring, P. (2003) *Qualitative Inhaltsanalyse. Grundlagen und Techniken.* Aufl. 8. Weinheim: Deutscher Studien Verlag.

McCormick, E. J. (1970) *Human factors engineering.* Aufl. 3. New York: McGraw-Hill.

McNeel. (2008) *Modeling tools for designers.* Zugriff am 11.08.2008 von http://www.rhino3d.com.

Milgram, P. & Colquhoun, H. (1999) A taxonomy of real and virtual world display integration. In: Ohta, Y. & Tamura, H. (Hrsg.) *Mixed reality: Merging real and virtual worlds.* New York: Springer. 5–30.

Milgram, P. & Drascic, D. (1997) Perceptual Effects In Aligning Virtual And Real Objects In Augmented Reality Displays. In: *Tagungsband 41st Annual Meeting of Human Factors & Ergonomics Society.* Albuquerque, NM, USA, Human Factors and Ergonomics Society, 1239-1243.

Milgram, P. & Kishino, F. (1994) A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays. *IEICE Transactions on Information Systems* E77-D(12).

Miller, G. A. (1956) The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review* 63, 81-97.

Miller, G. A., Galanter, E. & Pribram, K.-H. (1960) *Plans and the structure of behavior*. New York: Holt.

Mischok, P., Alber, S. & Robb, D. (1992) Anwendung neuer CA-Techniken im Automobildesign der BMW AG. In: VDI-Gesellschaft_Entwicklung-Konstruktion-Vertrieb (Hrsg.) *Tagungsband Datenverarbeitung in der Konstruktion '92. Internationale VDI-Fachtagung zur Systec '94 (VDI Beritchte)*. München, VDI-Verlag, Düsseldorf, 141-157.

Mohler, B. J., Creem-Regehr, S. H. & Thompson, W. B. (2006) The influence of feedback on egocentric distance judgments in real and virtual environments. In: *Tagungsband Applied Perception in Graphics and Visualisation (APGV '06)*. ACM Press, 9–14.

Mohs, C., Hurtienne, J., Israel, J. H., Naumann, A., Kindsmüller, M. C., Meyer, H. A. & Pohlmeyer, A. (2006a) IUUI–Intuitive Use of User Interfaces. In: Bosenick, T., Hassenzahl, M., Müller-Prove, M. & Peissner, M. (Hrsg.) *Usability Professionals 2006*. Stuttgart: German Chapter of the Usability Professionals' Association. 130-133.

Mohs, C., Hurtienne, J., Kindsmüller, M. C., Israel, J. H., Meyer, H. A. & IUUI-Research-Group (2006b) IUUI – Intuitive Use of User Interfaces: Auf dem Weg zu einer wissenschaftlichen Basis für das Schlagwort „Intuitivität". *MMI Interaktiv* 11, 75-84.

Mohs, C., Israel, J. H., Kindsmüller, M. C., Naumann, A., Hußlein, S. & IUUI-Research-Group (2007) Intuitive Benutzung als Ziel in der Produktentwicklung. In: Röse, K. & Brau, H. (Hrsg.) *Tagungsband Usability Professionals 2007*. Weimar, German Chapter der Usability Professionals' Association, 165-168.

Mulder, J. D. & Liere, R. v. (2000) Fast Perception-Based Depth of Field Rendering. In: *Tagungsband ACM symposium on Virtual reality software and technology (VRST'05)*. Seoul, Korea, ACM Press, 129-133.

Müller, F. D. (2007) *Intuitive digitale Geometriemodellierung in frühen Entwicklungsphasen*. Dissertation, München: Technische Universität München.

Müller, J. (1990) *Arbeitsmethoden der Technikwissenschaften. Sytematik, Heuristik, Kretivität*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.

Mundel, M. E. (1978) *Motion and time study: Improving productivity*. Aufl. 5th. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall.

Murata, A. & Iwase, H. (2001) Extending Fitts' law to a three-dimensional pointing task. *Human Movement Science* 20, 791-805.

Myers, B. A. (1989) User-interface Tools: Introduction and Survey. *IEEE Software* 6(1), 15-23.

Napier, J. (1956) The prehensile Movements of the human Hand. *Journal of Bone and Joint Surgery* 38-B(4), 902-913.

Naumann, A., Hurtienne, J., Israel, J. H., Mohs, C., Kindsmüller, M. C., Meyer, H. A. & Hußlein, S. (2007) Intuitive Use of User Interfaces: Defining a Vague Concept. In: Harris, D. (Hrsg.) *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics, HCII 2007*. Heidelberg: Springer. Vol. 13, 128-136.

Naumann, A., Pohlmeyer, A. E., Hußlein, S., Kindsmüller, M. C., Mohs, C. & Israel, J. H. (2008) Design for Intuitive Use: Beyond Usability. In: *Tagungsband CHI'08*. Florence, Italy, ACM Press, 2375-2378.

Nealen, A., Igarashi, T., Sorkine, O. & Alexa, M. (2007) FiberMesh: Designing Freeform Surfaces with 3D Curves. *ACM Transactions on Graphics (Proceedings of ACM SIGGRAPH 2007)* 26(3), Article 41.

Neider, J., Davis, T. & Woo, M. (1993) *OpenGL Programming Guide*. Reading, MA, USA: Addison-Wesley.

Neumann, J., Beckmann-Dobrev, B., Kulf, L., Israel, J. H. & Stark, R. (2009) Ein Renderingsystem für immersive Anwendungen in Forschung und Lehre. In: Gausemeier, J. & Grafe, M. (Hrsg.) *Tagungsband 8. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung*. Paderborn, Heinz Nixdorf Institut, 95-109.

Nielsen, J. (1986) A virtual protocol model for computer-human interaction. *International Journal Man-Machine Studies* 24, 301-312.

Nielsen, J. (1993) Noncommand user interfaces. *Communications of the ACM* 36(4), 83-99.

Norman, D. A. (1988) *The Psychology of Everyday Things*. New York: Basic Books.

Norman, D. A. (1990) *The Design of Everyday Things*. New York: Currency/Doubleday.

Norman, D. A. (2007) The next UI breakthrough, part 2: physicality. *interactions* 14(4), 46-47.

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: Individuals, Teams, Tools*. Berlin: Springer-Verlag. 243-252.

Pache, M. W. (2005) *Sketching for Conceptual Design. Empirical Results and Future Tools*. Dissertation, München: Technische Universität München.

Pahl, G. (1994) *Psychologische und pädagogische Fragen beim methodischen Konstruieren: Ergebnisse des Ladensburger Diskurses von Mai 1992 bis Oktober 1993*. Köln: Verlag TÜV Rheinland.

Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J. & Grote, K. H. (2005) *Konstruktionslehre. Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung. Methoden und Anwendung*. Aufl. 6. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag.

Parametric-Technology. (2008) *Pro/ENGINEER*. Zugriff am 10.08.2008 von http://www.ptc.com/products/proengineer/.

Pecher, D. & Zwaan, R. A., Hrsg. (2005) *Grounding cognition : the role of perception and action in memory, language, and thinking*. New York: Cambridge University Press.

Petruschat, J. (2001a) Essentials. *form+zweck. How to handle hands?* 18, 24-43.

Petruschat, J. (2001b) Gespräch. *form+zweck. How to handle hands?* 18, 3-9.

Petruschat, J. (2005) Das Leben ist bunt. Einige Bemerkungen zum Entwerfen. *form+zweck* 21, 100-111.

Phidgets. (2007) *Interface-Kit*. Zugriff am 16th Nov. 2007 von http://www.phidgets.com/.

Piaget, J. (1969) *Das Erwachen der Intelligenz beim Kinde*. Stuttgart: Klett.

Pierce, J., Stearns, B. & Pausch, R. (1999) Voodoo dolls: seamless interaction at multiple scales in virtual environments. In: *Tagungsband Symposium on interactive 3D graphics.* Atlanta, GA, USA, ACM Press, 141-145.

Piper, B., Ratti, C. & Ishii, H. (2002) Illuminating clay: a 3-D tangible interface for landscape analysis. In: *Tagungsband SIGCHI conference on Human factors in computing systems: Changing our world, changing ourselves (CHI'02).* Minneapolis, Minnesota, USA 355-362.

Ponn, J., Lindemann, U., Diehl, H. & Müller, F. (2004) Sketching in Early Conceptual Phases of Product Design: Guidelines and Tools In: Hughes, J. F. & Jorge, J. A. (Hrsg.) *Tagungsband Eurographics Workshop on Sketch-Based Interfaces and Modeling (SBIM).* Aire-la-Ville, Eurographics Association, 27-32.

Poupyrev, I., Billinghurst, M., Weghorst, S. & Ichikawa, T. (1996) Go-Go interaction technique: Non-linear mapping for direct manipulation. In: *Tagungsband User interface software and technology UIST'96.* ACM Press, 79-80.

Poupyrev, I., Weghorst, S., Billinghurst, M. & Ichikawa, T. (1997) A framework and testbed for studying manipulation techniques for immersive VR. In: *Tagungsband ACM symposium on Virtual reality software and technology VRST'97.* Lausanne, Switzerland ACM Press, 21-28.

Preiser, S. (2006) Creativity Research in German-Speaking Countries. In: Kaufmann, J. C. & Sternberg, R. J. (Hrsg.) *The International Handbook of Creativity.* New York: Cambridge University Press. 167-201.

Pugh, S. (1990) *Total Design: Integrated Methods for Successful Product Engineering.* Reading MA: Addison-Wesley.

Pylyshyn, Z. W. (1973) What the Mind's Eye Tells the Mind's Brain: A Critique of Mental Imagery. *Psychological Bulletin* 80, 1-24.

Ragan, Z. (2007) *Eine rechnerintegrierte Methode zur Produktkonzeption.* Dissertation, Berlin: Technische Universität Berlin.

Ramachandran, V. S. & Blakeslee, S. (1998) *Phantoms in the Brain: Human Nature and the Architecture of the Mind.* London: Fourth Estate.

Rasmussen, N. T., Störring, M., Moeslund, T. B. & Granum, E. (2006) Real Time Tracking for Virtual Environments using SCAAT Kalman Filtering and Unsynchronised Cameras. In: *Tagungsband International Conference on Computer Vision Theory and Applications (VISAPP).* Setúbal, Portugal.

Rauterberg, M. (2000) User Centered Design: Developments. *IPO Annual Progress Report*(35), 15-17.

Rauterberg, M. (2003) User Centered Design: When, Why and How. In: Graefe, E. (Hrsg.) *Tagungsband tekom Jahrestagung.* Wiesbaden, Gesellschaft für technische Kommunikation e.V. , 175-178.

Reeda, C. L., Klatzkyb, R. L. & Halgrenc, E. (2008) What vs. where in touch: an fMRI study. *NeuroImage* 25(3), 718-726.

Roetting, M., Huang, Y.-H., McDevitt, J. R. & Melton, D. (2003) When Technology Tells You How To Drive – Truck Driver's Attitudes Toward Feedback by Technology. In: *Transportation Research Part F.* Elsevier Publishing. 275-287.

Römer, A. (2002) *Unterstützung des Design Problem Solving: Einsatz und Nutzen einfacher externer Hilfsmittel in den frühen Phasen des konstruktiven Entwurfsprozesses.* Dissertation, Dresden: Technischen Universität Dresden.

Rötting, M. (2005) Mensch-Maschine-Systemtechnik. In: Urbas, L. & Steffens, C. (Hrsg.) *Tagungsband Zustandserkennung und Systemgestaltung - 6. Berliner Werkstatt Mensch-Maschine-Systeme (ZMMS Spektrum Band 19).* Berlin, VDI Verlag, 27-32.

Rötting, M. & Seifert, K. (2005) Multimodale Mensch-Maschine-Schnittstellen. In: Karrer, K., Gauss, B. & Steffens, C. (Hrsg.) *Beiträge zur Mensch-Maschine-Systemtechnik aus Forschung und Praxis - Festschrift für Klaus-Peter Timpe.* Düsseldorf: Symposion Publishing. 283-300.

Rouse, W. B. (1981) Human-Computer Interaction in the Control of Dynamic Systems. *ACM Computing Surveys* 13(1), 71-99.

Rupp, C. (2006) *Requirements-Engineering und -Management.* Aufl. 4. München: Carl Hanser Verlag.

Rutz, A. (1985) *Konstruieren als gedanklicher Prozeß.* Dissertation, München: Technische Universität München.

Ryu, J., Hashimoto, N. & Sato, M. (2005) Influence of Resolution Degradation on Distance Estimation in Virtual Space Displaying Static and Dynamic Image. In: *Tagungsband International Conference on Cyberworlds (CW'05).* Singapore, IEEE, 8-15.

Sachse, P. (2002) *Idea materialis: Entwurfsdenken und Darstellungshandeln. Über die allmähliche Verfertigung der Gedanken beim Skizzieren und Modellieren.* Berlin: Logos Verlag.

Sandbothe, M. (2003) Medien - Kommunikation - Kultur. Grundlagen einer pragmatischen Kulturwissenschaft. In: Karmasin, M. & Winter, C. (Hrsg.) *Kulturwissenschaft als Kommunikationswissenschaft: Projekte, Probleme, Perspektiven.* Opladen: Westdeutscher Verlag. 257-271.

Schkolne, S. (2006) Making Digital Shapes by Hand. In: *Tagungsband Interactive Shape Editing, ACM SIGGRAPH Courses 2006.* ACM Press, 84-93.

Schkolne, S., Pruett, M. & Schröder, P. (2001) Surface drawing: creating organic 3D shapes with the hand and tangible tools. In: *Tagungsband SIGCHI conference on Human factors in computing systems (CHI'01).* Minneapolis, Minnesota, USA, ACM Press, 261-268.

Schmauks, D. (1991) *Deixis in der Mensch-Maschine-Interaktion. Multimediale Referentenidentifikation durch natürliche und simulierte Zeigegesten.* Tübingen: Niemeyer.

Schön, D. A. (1983) *The Reflective Practitioner. How professionals think in action.* New York: Basic Books.

Schramm, W. (1971) The Nature of Communication between Humans. In: Schramm, W. & Roberts, D. F. (Hrsg.) *The Process and Effects of Mass Communication.* Aufl. Revised Edition. Urbgana, Illinois: University of Illinois Press. 3-53.

Schreiber, J. (2005) *Ein Maler aus Deutschland. Gerhard Richter. Das Drama einer Familie.* München, Zürich: Pendo.

Schulz, W. (2000) Kommunikationsprozeß. In: Noelle-Neumann, E., Schulz, W. & Wilke, J. (Hrsg.) *Publizisitk Massenkommunikation.* Aufl. 7. Frankfurt/Main: Fischer Taschenbuchverlag. 140-171.

Schütze, M. (2003) *Die frühen Phasen des konstruktiven Entwerfens –Unterstützungspotential verschiedenartiger Arbeitsmittel.*Dresden: Technische Universität Dresden.

Sedus-Stoll-AG. (2008) *Produktprospekt "open mind / open up".* Zugriff am 11.08.2008 von http://www.sedus.de/se/de/downloads/files-products/P/P_open_mind_open_up_dt.pdf.

Seeger, H. (2005) *Design technischer Produkte, Produktprogramme und -systeme. Industrial Design Engineering.* Aufl. 2. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.

Seichter, H. & Kvan, T. (2004) Tangible Interfaces in Design Computing. *Virtual Environment* 2, 159-166.

SensAble-Technologies-Inc. (2005) *PHANTOM Haptic Devices.* Zugriff am 05.09.2008 von http://www.sensable.com/haptic-phantom-premium-6dof.htm.

Serefoglou, S., Park, M., Radermacher, K. & Schmidt, L. (2005) Untersuchungen der Hand-Auge-Koordination bei einem videobasierten Spiegel-HMD. In: Urbas, L. & Steffens, C. (Hrsg.) *Tagungsband 6. Berliner Werkstatt Mensch-Maschine-Systeme BWMMS'05: Zustandserkennung und Systemgestaltung.* Berlin, VDI-Verlag, 287-290.

Shannon, C. E. & Weaver, W. (1949) *The Mathematical Theory of Communication.* Urbana, Illinois: University of Illinois Press.

Sharlin, E., Watson, B., Kitamura, Y., Kishino, F. & Itoh, Y. (2004) On tangible user interfaces, humans and spatiality. *Personal and Ubiquitous Computing* 8(5), 338–346.

Shepard, R. N. (1978) Externalization of mental images and the act of creation. In: Randhawa, B. S. & E., C. W. (Hrsg.) *Visual learning, thinking, and communication.* New York: Academic Press.

Shepard, R. N. & Metzler, J. (1971) Mental rotation of three-dimensional objects. *Science* 171, 701-703.

Sheskin, D. (2007) The Friedman Two-Way Analysis of Variance by Ranks. In: Sheskin, D. (Hrsg.) *Handbook of Parametric and Nonparametric Statistical Procedures.* Aufl. 4. CRC Press. 1075–1088.

Shneiderman, B. (1999) User Interfaces for Creativity Support Tools. In: *Tagungsband Creativity & Cognition.* Loughborough, UK, ACM Press, 15-22.

Shneiderman, B. (2000) Creating Creativity: User Interfaces for Supporting Innovation. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction* 7(1), 114-138.

Shneiderman, B. (2002a) Creativity Support Tools. In: *Tagungsband Creativity & Cognition.* Loughborough, UK, ACM Press, 1-2.

Shneiderman, B. (2002b) *User Interface Design.* Aufl. 3. Bonn: mitp-Verlag.

Shneiderman, B., Fischer, G., Czerwinski, M., Myers, B., Candy, L., Edmonds, E., Eisenberg, M., Giaccardi, E., Hewett, T., University, D., Jennings, P., Kules, B., Nakakoji, K., Nunamaker, J., Pausch, R., Selker, T., Sylvan, E. & Terry, M. (2006) Creativity Support Tools: Report From a U.S. National Science Foundation Sponsored Workshop. *International Journal of Human-Computer Interaction* 20(2), 61-77.

Simon, A. (2005) First-person experience and usability of co-located interaction in a projection-based virtual environment. In: *Tagungsband ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology (VRST).* Monterey, CA, USA, ACM Press, 23-30.

Simon, H. (1989) The scientist as a problem solver. In: Klahr, D. & Kotovsky, K. (Hrsg.) *Complex information processing: the impact of Herbert Simon.* Hillsdale: Erlbaum. 375-398.

Smallman, H. S., John, M. S., Oonk, H. M. & Cowen, M. B. (2001) Information Availability in 2D and 3D Displays *IEEE Computer Graphics and Applications* 21(5), 51-57.

Smeets, J. & Brenner, E. (1999) A new view on grasping. *Mot Control* 3, 237-371.

Snyder, C. (2003) *Paper prototyping : the fast and easy way to design and refine user interfaces.* San Diego, CA: Morgan Kaufmann Pub.

Spur, G. & Krause, F.-L. (1997) *Das virtuelle Produkt.* München: hanser Verlag.

Staples, D. (1995) Assoziativität und featurebasierende Modellierung. *CAD-CAM Report* 13(10), 80-86.

Stappers, P. J., Saakes, D., Helm, A. v. d. & Pasman, G. (2007) New media tools to support design conceptualization. In: *Tagungsband Euromedia 2007. Thirteenth annual scientific conference on web technology, new media, communications and telematics theory, methods, tools, and applications.* Delft, Niederlande, 5-10.

Stark, R. & Krause, F.-L. (2008) Potentials and Future Innovation of Virtual Product Creation. In: *Tagungsband 53rd IWK – Internationales Wissenschaftliches Kolloquium: Prospects in Mechanical Engineering.* Ilmenau, Technische Universität Ilmenau.

Sternberg, R. J. & Lubart, T. I. (1991) An investment theory of creativity and ist development. *Human Development* 34, 1-31.

Sternberg, R. J. & Lubart, T. I. (1999) The Concept of Creativity. In: Sternberg, R. J. (Hrsg.) *Handbook on Creativity.* Cambridge: Cambridge University Press. 3-15.

Stork, A. (2000) *Effiziente 3D-Interaktions- und Visualisierungstechniken für benutzer-zentrierte Modellierungssysteme.* Dissertation, Darmstadt: Technischen Universität Darmstadt.

Streitz, N. A. (1986) Cognitive ergonomics: An approach for the design of user-oriented interactive systems. In: Klix, F. & Wandke, H. (Hrsg.) *MACINTER I.* Amsterdam, NL: North-Holland. 21–33.

Sun, J. Y. & Perona, P. (1996) Preattentive Perception of Elementary Tree-dimensional Shapes. *Vision Research* 36(12), 2515-2529.

Sutherland, I. E. (1964) Sketchpad a Man-Machine Graphical Communication System. *Simulation* 2(3), 3-19.

Sutherland, I. E. (1965) The Ultimate Display. In: *Tagungsband IFIP Congress.* 506-508.

Suwa, M., Purcell, T. & Gero, J. S. (1998) Macroscopic analysis of design processes based on a scheme for coding designers' cognitive actions. *Design Studies* 19(4), 455-483.

Suwa, M. & Tversky, B. (1996) What Architects See in their Sketches: Implications for Design Tools. In: *Tagungsband Conference companion on Human factors in computing systems: common ground (CHI'96).* Vancouver, British Columbia, Canada ACM Press, 191-192.

Swendson, G. B. (1991) The influence of interface style on problem solving. *International Journal Man Machine Studies* 35, 379-397.

Tang, J. C. (1991) Findings from Observational Studies of Collaborative Work. *International Journal of Man-Machine Studies* 34(2), 143-160.

Tano, S., Kodera, T., Nakashima, T., Kawano, I., Nakanishi, K., Hamagishi, G., Inoue, M., Watanabe, A., Okamoto, T., Kawagoe, K., Kaneko, K., Hotta, T. & Tatsuoka, M. (2003) Godzilla: Seamless 2D and 3D Sketch Environment for Reflective and Creative Design Work. In: *Tagungsband INTERACT 2003*. IOS Press, 311-318.

Timpe, K. P. & Kolrep, H. (2002) Das Mensch-Maschine-System als interdisziplinärer Gegenstand. In: Timpe, K., Jürgensohn, T. & Kolrep, H. (Hrsg.) *Mensch-Maschine-Systemtechnik: Konzepte, Modellierung, Gestaltung, Evaluation*. Düsseldorf: Symposion. 9-40.

Todd, J. T. (2004) The visual perception of 3D shape. *TRENDS in Cognitive Sciences* 8(3), 115-121.

Tversky, B. (2003) Sketching for Design and Design of Sketches. In: Lindemann, U. (Hrsg.) *Human Behaviour in Design*. Berlin: Springer-Verlag. 79–86.

Uhlmann, J. (2005) *Die Vorgehensplaung Designprozess für Objekte der Technik*. Dresden: TUDpress Verlag der Wissenschaften.

Ullmer, B. & Ishii, H. (2001) Emerging frameworks for tangible user interfaces. In: Carroll, J. M. (Hrsg.) *Human-computer interaction in the new millennium*. Reading, Massachusetts, USA: Addison-Wesley. 579–601.

Ullmer, B., Ishii, H. & Jacob, R. J. (2005) Token+constraint systems for tangible interaction with digital information. *ACM Transactions Computer-Human Interaction* 12(1), 81–118.

Unger, P. (2006) *All The Power In The World*. Aufl. 1. Oxford: Oxford University Press.

Ungerleider, L. G. & Mishkin, M. (1982) Two cortical visual systems. In: Ingle, D. J., Goodale, M. A. & Mansfield, R. J. W. (Hrsg.) *Analysis of visual behavior*. Cambridge: MIT Press. 549-586.

Urban, K. K. (1993) Neuere Aspekte in der Kreativitätsforschung. *Psychologie in Erziehung und Unterricht* 39, 133-148.

Urban, K. K. (2004) *Kreativität. Herausforderung für Schule, Wissenschaft und Gesellschaft*. Münster: LIT Verlag.

Urban, K. K. & Jellen, H. G. (1995) *TSD-Z: Test zum schöpferischen Denken - zeichnerisch*. Frankfurt/Main: Swets.

van der Ziel, A. (1970) *Noise. Sources, characterization, measurement*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, Inc.

VDI-2206 (2003) *Entwicklungsmethodik für Mechatronische Systeme*. Berlin: Beuth-Verlag.

VDI-2209 (2006) *3-D-Produktmodellierung. Richtlinien-Entwurf*. Düsseldorf: VDI-Verlag.

VDI-2221 (1993) *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*. Düsseldorf: VDI-Verlag.

VDI-2424 (1988) *Industrial Design; Grundlagen, Begriffe, Wirkungsweisen; Der Industrial-Design-Prozeß (Blatt 1)*. Aufl. inhaltlich überprüft und unverändert weiterhin gültig: Januar 2001. Düsseldorf: VDI-Verlag.

Verbeke, G. & Molenberghs, G. (2000) *Linear Mixed Models for Longitudinal Data.* New York: Springer.

Violentyev, A., Shimojo, S. & Shams, L. (2005) Touch-induced visual illusion. *Neuroreport* 16(10), 1107-1110.

Völlinger, U., Beckmann-Dobrev, B., Schäfer, J., Israel, J. H. & Stark, R. (2009) Intuitive Haptische Interfaces für die Deformationssimulation. In: Gausemeier, J. & Grafe, M. (Hrsg.) *Tagungsband 8. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung.* Paderborn, Heinz Nixdorf Institut, 189-203.

von Kleist, H. (2002) *Über das Marionettentheater. Über die allmählige Verfertigung der Gedanken beim Reden.* Frankfurt (Oder): Kleist Museum.

Walairacht, S., Yamada, K., Hasegawa, S., Koike, Y. & Sato, M. (2002) 4 + 4 fingers manipulating virtual objects in mixed-reality environment. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* 11(2), 143-143.

Ward, W. C. (1969) Creativity and environmental cues in nursery school children. *Development Psychology* 1, 543-547.

Ware, C. (2004) *Information Visualization. Perception for Design.* Aufl. 2. San Francisco: Morgan Kaufmann.

Ware, C. & Balakrishan, R. (1994) Reaching for Objects in VR Displays: Lag and frame rate. *ACM Transactions on Computer Human Interaction* 1(4), 331–356.

Ware, C. & Rose, J. (1999) Rotating virtual objects with real handles. *ACM Transaction on Computer-Human Interaction* 6(2), 162-180.

Weiser, M. (1993) Some computer science issues in ubiquitous computing. *CACM* 36(7), 74-83.

Weizenbaum, J. (2001) *Computermacht und Gesellschaft.* Frankfurt am Main: Suhrkamp Verlag.

Welch, G. & Bishop, G. (1997) SCAAT: Incremental Tracking with Incomplete Information. In: *Tagungsband 24th International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques.* ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 333-344.

Wertheimer, M. (1912) Experimentelle Studien über das Sehen von Bewegungen. *Zeitschrift für Psychologie* 61, 161-265.

Wetzstein, A. & Hacker, W. (2002) Sprachgestützte Reflexion verbessert die Entwurfsergebnisse unabhängig von ihrer Entstehungsgeschichte. In: Hacker, W. (Hrsg.) *Denken in der Produktentwicklung. Psychologische Unterstützung in den frühen Phasen.* Zürich: vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, Rainer Hampp Verlag. Vol. 33, 143-153.

Wickens, C. D., Gordon, S. E. & Liu, Y. (1998) *An introduction to human factors engineering.* New York: Longman.

Wiese, E., Israel, J. H., Zöllner, C., Pohlmeyer, A. E. & Stark, R. (2009) The Potential of Immersive 3D-Sketching Environments for Design Problem-Solving. In: *Tagungsband 13th International Conference on Human-Computer Interaction HCI 2009.* San Diego, CA, USA, 485-489.

Willemsen, P., Colton, M. B., Creem-Regehr, S. H. & Thompson, W. B. (2004) The effects of head-mounted display mechanics on distance judgments in virtual envi-

ronments. In: *Tagungsband Applied Perception in Graphics and Visualisation (APGV '04).* ACM Press, 35-48.

Willemsen, P., Gooch, A. A., Thompson, W. B. & Creem-Regehr, S. H. (2008) Effects of Stereo Viewing Conditions on Distance Perception in Virtual Environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* 17(1), 91-101.

Wilson, F. R. (1998) *The hand. How it use shapes the brain, language, and human culture.* New York: Pantheon Books.

Wingrave, C. A., Tintner, R., Walker, B. N., Bowman, D. A. & Hodges, L. F. (2005) Exploring Individual Differences in Raybased Selection: Strategies and Traits. In: *Tagungsband IEEE Virtual Reality.* 163-170.

Winkler, H. (2004) Mediendefinition. *Medienwissenschaft*(1).

Winograd, T. & Flores, F. (1986) *Understanding Computers and Cognition. A New Foundation for Design.* New Jersey: Ablex Publishing.

Woods, A. J. & Tan, S. S. L. (2002) Characterising Sources of Ghosting in Time-Sequential Stereoscopic Video Displays. In: *Tagungsband SPIE Stereoscopic Displays and Applications XIII, Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems IX.* San Jose, California, USA, 66–77.

Wozny, M. J. (1992) Research Trends in the U. S. for the Next Generation CAD Systems. In: Krause, F.-L., Ruland, D. & Jansen, H. (Hrsg.) *Tagungsband GI Fachtagung CAD'92 - Neue Konzepte zur Realisierung anwendungsorientierter CAD Systeme.* Berlin, Springer-Verlag, 30-65.

Zangemeister, C. (1973) *Nutzwertanalyse in der Systemtechnik. Eine Methodik zur multidimensionalen Bewertung und Auswahl von Projektalternativen.* Aufl. 3. München: Wittmann.

Zempel, J. (2002) *Strategien der Handlungsregulation.* Dissertation, Gießen: Justus-Liebig-Universität.

Zhai, S., Milgram, P. & Buxton, W. (1996) The Influence of Muscle Groups on Performance of Multiple Degree-of-Freedom Input. In: *Tagungsband CHI '96.* ACM Press, 308–315.

Zhang, L. & Sun, Z. (2007) An experimental comparison of machine learning for adaptive sketch recognition *Applied Mathematics and Computation* 185(2), 1138-1148.

Zimbardo, P. G. (1995) *Psychologie.* Aufl. 6., neu berab. und erweitert / dt. Bearbeitung von Siegfried Hoppe-Graf, Barbara Keller und Irma Engel. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag.

Zöllner, C. (2007) *Entwurf und Gestaltung eines hybriden Werkzeugs zum Skizzieren im dreidimensionalen Raum.* Diplom, Dresden: Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, University of Applied Sciences (FH)

Zöllner, C. (2008) Three-dimensional sketching. *form+zweck* 22, 22-31.

12
Anhang

12.1 Der Designprozess im Fahrzeugbau

Das Fahrzeugdesign gilt „allgemein als die schwierigste Designaufgabe, bei der alle Design-Teilaufgaben sowohl im Fahrzeug-Exterior wie im Fahrzeug-Interior auftreten." (Seeger, 2005, S. 87). Global operierende Fahrzeughersteller unterhalten oft weltweit verteilte, sogenannte Advanced-Design Studios, die den Designabteilungen am Heimatsitz des Unternehmens zuarbeiten. Hier werden unabhängig von einer raschen Serienreife kreative Ideen entwickelt und in Forschungs- und Visionsfahrzeugen umgesetzt, welche erst zwei bis drei Fahrzeuggenerationen, beziehungsweise drei bis zwanzig Jahre später marktfähig werden könnten. Von diesem Vorgehen verspricht man sich „stilistische Vielfalt, die notwendig ist, um über Jahre im Voraus zu erkennen, (...) wie sich die Ansprüche der Kunden entwickeln werden" (vgl. Daimler-AG, 2006).

Im Fahrzeugentwicklungsprozess werden die Entwicklungsphasen im Voraus zeitlich terminiert und mit sogenannten „Quality Gates" (vgl. Daimler-AG, 2006) versehen, zu denen Entwicklungsfortschritte überprüft werden und Übertritte in die nächsten Entwicklungsphasen nur dann vollzogen werden, wenn die Entwürfe einen ausreichenden Reifegrad erreicht haben.

Lüddemann (1996) beschreibt die Arbeitsweise des Fahrzeugdesigns folgendermaßen (vgl. auch Daimler-AG, 2006; Daimler-AG, 2008a; Daimler-AG, 2008b): Die Entwicklung beginnt zunächst mit einem divergenten Prozess, in dem Designkonzepte und Themen erarbeitet werden, die eine langfristige Marktfähigkeit des Produkts sichern sollen. Unterstützt wird diese Phase in großen Unternehmen oft von einer hauseigenen Trendforschung: „Wir laufen keinen Modeerscheinungen hinterher (...), sondern versuchen langfristige Trends aufzuspüren, die über Jahrzehnte den Wert der Marke (...) steigern" (Gorden Wagener, Advanced-Design Mercedes-Benz; Daimler-AG, 2008a, S. 18). Die eingangs (Abschnitt 1.1.1, S. 2) beschriebene Konvergenz im Gebrauch technischer Produkte findet sich auch im Fahrzeugdesign bestätigt. So erwarten die Entwickler der Advanced-Design Studios der Daimler AG, dass den „Autofahrern von morgen weder PS noch Hubraum wichtig" sein werden, statt dessen Elektroautos, Speicherkapazität, mobiles Web und Unterhaltungselektronik, welche über einheitliche Benutzungsoberflächen verfügen werden, die die Anwender „etwa vom iPhone oder von Spielkonsolen kennen." (a. a. O., S. 23)

Die primären Medien der konzeptionellen Phase sind zunächst perspektivische Skizzen und farbige Zeichnungen. Zur weiteren Ausarbeitung der Entwürfe werden auch Grafiktabletts und CAID-Systeme eingesetzt (vgl. Abbildung 99, vgl. auch Schütze 2003) „Jede gute Idee fängt bei mir mit einem Wegwerfkuli und einem leeren Blatt Papier an. Dann lasse ich meinen Ideen freien Lauf." (Nicolas Garfias, Advanced-Design Mercedes-Benz; Daimler-AG, 2008a, S. 18).

Für ein Fahrzeugentwicklungsprojekt werden ca. 20 Designkonzepte erarbeitet, unter denen der Unternehmensvorstand drei bis vier auswählt, die anschließend in einer konvergenten Designphase detailliert ausgearbeitet werden. Primäre Darstellungsmittel dieser Phase sind maßstäbliche Skizzen des Packageplans, der die Anforderungen des Lastenheftes, insbesondere konstruktionsorientierte Maße, anschaulich abbildet, und sogenannte Tapepläne, die die Hauptlinien der Fahrzeuggestaltung mittels flexibler Klebebänder bestimmen. Zur Detailabstimmung von Maßkonzepten und Designentwürfen zwischen Exterior- und Interior-Design einerseits und Konstruktion andererseits werden in dieser Phase inzwischen oft VR-basierte Werkzeuge wie Powerwalls

eingesetzt, die allen Beteiligten ein integriertes Kommunikations- und Vergleichsmedium bereitstellen (vgl. Daimler-AG, 2006).



Abbildung 99: Papier- und stiftbasiertes Skizzieren, Skizzieren mittels Grafiktablett, Modellieren von Tonmodellen in den konzeptionellen und entwerfenden Phasen des Automobilbaus (aus Daimler-AG, 2008a; Daimler-AG, 2006, genehmigter Abdruck).

Zur weiteren Ausarbeitung der Details des Fahrzeugmodells werden anhand der Tapepläne oder elektronisch nachbereiteter zweidimensionaler Skizzen physische Tonmodelle, üblicher Weise im Maßstab 1:4 oder 1:8 erstellt. Das materielle Ausarbeiten ist für den Designer „essentiell für die Transformation von Eigenschaften einer Form“ und kann nur qualitativ beschrieben und intuitiv vollzogen werden (Lüddemann, 1996, S. 15). Bis auf das rechnergesteuerte Fräsen des Grobmodells wird hier auf digitale Technik oft bewusst verzichtet: „Eine wohlproportionierte Linie, die

atmet und den Geist der Marke (...) vermittelt, zieht man immer noch am besten mit der Hand." (David Slaughter, Advanced-Design Mercedes-Benz, Daimler-AG, 2008a, S. 18)

Die auch farblich vollständig ausgearbeiteten Tonmodelle werden dem Unternehmensvorstand und leitenden Designern vorgestellt. Diese wählen wiederum einen oder mehrere Entwürfe aus, die im Format eins-zu-eins hergestellt werden und nach einem erneuten Auswahlverfahren schließlich in die Ausarbeitung für die Serienproduktion überführt werden.

Neben den klassischen Methoden des Produktdesigns haben sich in der Fahrzeugindustrie mittlerweile auch wesentlich ausgeprägtere digitale Vorgehensweisen durchgesetzt, mit denen versucht wird, ausschließlich digitale Modelle über den gesamten Entwicklungsprozess zu nutzen. Durch deren Einsatz wird es auch möglich, Produkteigenschaften wie beispielsweise die Fertigbarkeit und Wartbarkeit schon früh abzusichern beziehungsweise Fehler schon am digitalen Modell zu erkennen. Der Einsatz von Virtual Reality-Methoden für interaktive Design-Reviews übernimmt dabei zunehmend eine zentrale Rolle der Entwicklungskoordination und Zertifizierung von Entwicklungszwischenständen (Abschnitt 10.2.1, S. 240). Auch für die konzeptionellen Phasen des Automotive Design werden zunehmend Softwarelösungen wie z. B. Alias Studio verwendet (vgl. Autodesk, 2009), die eine rasche Entwicklung und Darstellung von Konzepten mithilfe von Skizzen, 3D-Modellen, Illustrationen, fotorealistischen Renderings und Animationen erlauben.

12.2 Der Designprozess in der Möbelindustrie

Aufgrund der geringeren technischen und gestalterischen Tiefe der zu entwerfenden Produkte ist der Entwicklungsprozess in der Domäne Möbeldesign[1] weniger verteilt und bezieht weniger Personen ein als im Automobilbau. Die wesentlichen Grundzüge des Entwicklungsprozesses ähneln den in Abschnitt 2.3 (S. 29) beschriebenen Referenzprozessen. Häufig sind die Entwicklungsprozesse im Sinne eines Qualitätsmanagements nach DIN ISO 9001 darüber hinaus unternehmensintern fixiert.

In der planenden Phase wird für jedes Möbelprojekt zunächst typischerweise ein Lastenheft formuliert, das maßgeblich von der Marketingabteilung erstellt wird. Da Möbel zu einem hohen Anteil exportiert werden, wird vom Marketing regelmäßig die Situation auf den internationalen Zielmärkten analysiert und in die Planung integriert. Im Lastenheft werden Einsatzbereiche, Zielkunden, Produktmerkmale wie Funktionalität und „Anmutungsleistung", relevante Normen, Preisgefüge und eine Vorkalkulation eingestellt. Dieses Lastenheft bildet den ersten Meilenstein im Projektablauf und wird von Unternehmensvorstand, Marketing und der Entwicklungsleitung als gemeinsames Entwicklungsziel abgestimmt. Falls unvorhergesehene Änderungen wie z. B. Änderungen relevanter Normen, neu auf dem Markt erscheinende Wettbewerbsprodukte oder Probleme der Prozessplanung auftreten, werden Lastenhefte nachträglich ergänzt und korrigiert. Auch „brillante Designkonzepte", die erst während der Entwicklung entstehen, aber nicht Lastenheft gerecht sind, können zu dessen nachträglicher Änderung führen. Während aller Entwurfsphasen fließt weiteres Erfahrungswissen der Designer und Konstrukteure, beispielsweise

[1] Dieser Abschnitt basiert auf persönlicher Kommunikation mit Möbeldesignern.

hinsichtlich Fertigbarkeit und Ergonomie, implizit ein. Dessen Einfluss auf den Entwurfsprozess wird von Designern auch als „Zensor im Kopf“ beschrieben.

Strichskizzen sind die primären Medien der Designer in den ersten Phasen von Möbelneukonstruktionen (vgl. Abbildung 100). Relativ früh, insbesondere in der Variantenkonstruktion, erfolgt jedoch ein Wechsel zu CAS/CAID-Systemen[1], um bereits elektronisch vorliegende Elemente wie z. B. Stützelemente, Gasfedern oder Höhenversteller aufwandsarm in den Entwurf einfließen lassen zu können. Diese Möglichkeit nennen Designer auch „süßes Gift“, das sie vom Suchen nach alternativer Lösungsvarianten abhalten kann. Skizzen werden weiterhin parallel zum Gebrauch von CAID-Systemen verwendet, insbesondere um Details auszuarbeiten. Da in der Arbeit erfahrener Möbeldesigner Designrücksprünge, die das gesamte Produktkonzept betreffen, untypisch sind, werden hierzu im weiteren Projektfortschritt auch keine weiteren Skizzen erstellt. Nur selten werden physische Modelle manuell angefertigt. Stattdessen werden Möbelmodelle, vor allem Sitzmöbel, mittels Rapid-Prototyping-Verfahren direkt auf Grundlage der CAID-Daten erstellt, indem sie beispielsweise aus Formschaum gefräst werden.

Der zweite Meilenstein eines Möbelprojekts besteht in der Regel in der Designfreigabe durch das Management. Hierzu werden verschiedene Ansichten des Möbelstücks und Maßtabellen erstellt, aufgrund derer über die Freigabe entschieden wird (vgl. Abbildung 100). Die Designer bestimmen mit ihren Entwürfen bereits zahlreiche Rahmenbedingungen, die auch Material und Fertigungstechniken betreffen. Sie sind aber bestrebt, dem Konstrukteur möglichst viele Freiheiten hinsichtlich der technologischen Umsetzung zu lassen, damit dieser geeignete Fertigungsverfahren auswählen bzw. flexibel in der Wahl eines Zulieferers sein kann.

[1] Häufig wird das 3D-Modelliersystem Rhinoceros (vgl. McNeel, 2008) eingesetzt, insbesondere für die Modellierung von Freiformflächen.

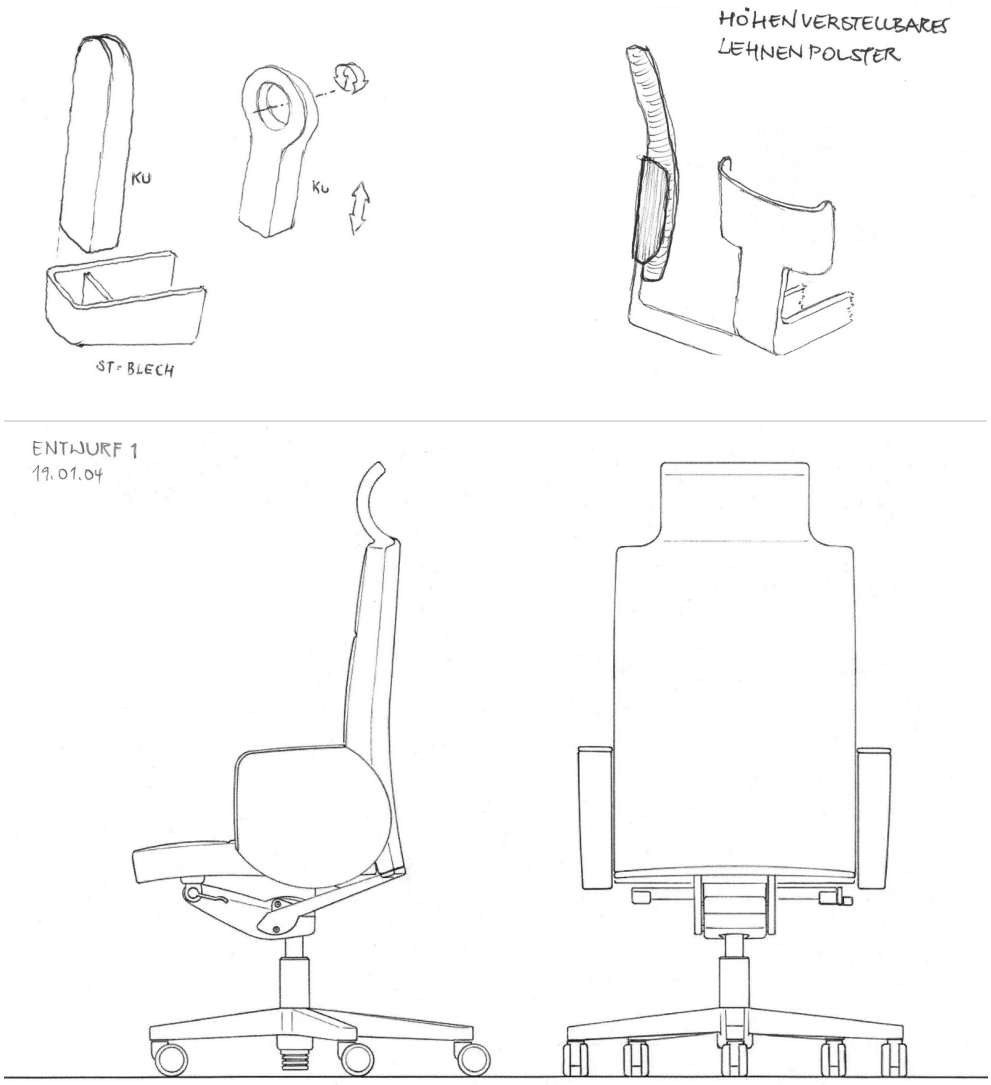


Abbildung 100: Produktskizzen und -seitenansichten zur Designfreigabe (Sedus-Stoll-AG, 2008).

Nach der Designfreigabe werden die digitalen Produktmodelle an den Konstrukteur übergeben. Diese beschreiben jedoch nur die Produkthülle, die innere Produktkonstruktion muss vom Konstrukteur erstellt werden. Daher werden in der Regel das komplette Produkt mittels CAD neu modelliert[1] und sämtliche für die Serienfertigung notwendigen Details wie beispielsweise Verrippungen und Verschraubungen integriert.

[1] In der Produktausarbeitung werden häufig integrierte CAD/CAM/CAE-Lösungen wie das System ProEngineer (vgl. Parametric-Technology, 2008) eingesetzt.

12.3 Signalstärke und Rauschen in der Mensch-Maschine-Interaktion

Das bereits in Abschnitt 3.1.5 (S. 43) in Bezug auf den Selbstkommunikationsprozess zwischen Mensch und Skizze diskutierte Kommunikationsmodell von Shannon und Weaver (1949) und das darin enthaltende Theorem der effektiven Informationskapazität *C* eines Kommunikationskanals (Gleichung 1) bildet die Grundlage vieler prädiktiver Modelle der Mensch-Maschine-Interaktion. Prädiktive Modelle ermöglichen, hypothetische *a priori* Aussagen über das Benutzerverhalten in Mensch-Maschine-Systemen zu treffen, ohne diese Systeme implementieren zu müssen. Das Shannon-Weaver Theorem gibt die effektive Informationskapazität *C* eines Kommunikationskanals der Bandbreite *B* in der künstlichen Größe Bits pro Sekunde (bit/s) an, wobei diese bestimmt wird durch die Signalstärke *S* und die Stärke des die Kommunikation störenden Rauschens *N*.

$$C = B \log_2\left(\frac{S}{N+1}\right)$$ Gleichung 1

Rauschen kann im Kontext der Mensch-Maschine-Kommunikation als physische Störgröße beschrieben werden, die die Qualität der beiderseitig erzeugten Nutzsignale durch ungleichmäßige Einzelschwingungen beeinträchtigt und die Unsicherheit der Dekodierung und des gesamten Kommunikationsprozesses erhöht. In Fällen, in denen die Signalleistung geringer als die Rauschleistung ist (engl. *signal-to-noise-ratio, SNR*), kann keine Signalübermittlung und somit keine Kommunikation stattfinden (vgl. van der Ziel, 1970). In technischen Systemen wird das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) als dimensionslose Einheit aus dem Quotient von Nutzsignalleistung P_S und Rauschleistung P_N definiert (Gleichung 2):

$$SNR = \frac{P_S}{P_N}$$ Gleichung 2

Aufgrund der Mehrstufigkeit (Abschnitt 4.2, S. 67) und Vielfältigkeit der in Mensch-Maschine-Systemen übertragenen Signale und Informationen treten variierende Signalstärken und Rauschen in verschiedenen Modalitäten und verschiedenen Phasen der menschlichen Informationsverarbeitung (Abschnitt 4.1, S. 60) und an unterschiedlichen Orten der Systemschnittstellen auf. Beispiele hierfür sind visuelle Artefakte in digitalen Bildern, variierende Helligkeiten und Kontraste, Lichtreflektionen und Flackern visueller Anzeigen (vgl. Luczak et al., 2003), akustische maschinelle Störgeräusche, fehlende oder zu grobe haptische Rückkopplung (vgl. Iwata, 2003) und eine damit einhergehende fehlende „Be-greifbarkeit" der Schnittstelle (vgl. Knauer, 2008; Seichter & Kvan, 2004). Auch ein zeitlicher und räumlicher Versatz (engl. *aliasing, nonlinearity*) zwischen der Bewegung eines Eingabegeräts (beispielsweise einer Computermaus) und dem dadurch kontrollierten Cursor beziehungsweise Mauszeiger (vgl. Hinkley, 2003) wirken sich auf die Signalübertragung zwischen Mensch und Maschine aus. Im Rahmen dieser Arbeit werden zur Erhöhung der

Informationskapazität der Mensch-Maschine-Kommunikation insbesondere physische und hybride physisch/grafisch virtuelle Schnittstellen vorgeschlagen, mittels derer das Rauschens reduziert und die Signalstärken erhöht werden können (Abschnitt 4.5.1, S. 94).

Die Signaldetektion des Benutzers wird neben der physikalischen Qualität der Signale weiterhin von seiner Erfahrung, Aktiviertheit (Wachheit) und Motivation, der Kenntnis von Metainformationen über die Informationsquelle und der Einschätzung von Auswirkungen aufgrund von Fehleinschätzungen (Fehlalarmen, engl. false alarms, und Auslassungen, engl. misses) bestimmt (vgl. Green & Swets, 1966).

12.4 Fitts' Law im dreidimensionalen Raum

Zur Modellierung insbesondere des sensumotorischen Verhaltens von Benutzern existieren unzählige Ansätze, die dieses mit variierender Vollständigkeit entweder deskriptiv erklären oder prädizieren (vgl. MacKenzie, 2003). In die Modelle fließen dabei sowohl technische Faktoren als auch Determinanten menschlichen Verhaltens ein, wie Reaktionszeiten, neuromotorische Trägheiten, Wahrnehmungsschwellen sowie motorisches und wahrnehmungsbedingtes Rauschen (vgl. Rouse, 1981).

Eines der wichtigsten prädiktiven Modelle, die auf Shannon und Weavers Theorem der effektiven Informationskapazität basieren, ist „Fitts' Law" zur Prädiktion von mittleren Ausführungszeiten *MT* eindimensionaler Zeigeaufgaben (vgl. Fitts, 1954). In Benutzerstudien zu schnellen zielgerichteten Bewegungen können mittels dieses Modells typischerweise mehr als 85 Prozent der Varianz aufgeklärt werden (vgl. Hinkley, 2003). In Fitts' Modell wird die Signalstärke *S* aus Shannons' Theorem durch die Entfernung *D* zwischen Zielposition und aktueller Position eines Cursors sowie die Stärke des Rauschens *N* durch die Größe des Zielobjekts *W* ersetzt (Gleichung 3). Der so entstehende Term $\log_2 (D / W + 1)$ wird als Index of Difficulty (*ID*) bezeichnet (Gleichung 4, Gleichung 5). Zur Anwendung des Modells müssen die systemspezifischen Konstanten *C1* und *C2* entweder bekannt oder jeweils experimentell empirisch bestimmt werden. Dabei bilden *C1* die Summe der mittleren Reaktionszeit der Benutzer auf die Präsentation eines Stimulus sowie die benötigte Zeit zur Bestätigung der vollständigen Ausführung und *C2* die Bandbreite der Informationsübertragung in der Mensch-Maschine-Schnittstelle ab.

$$\mathrm{MeanTime} = \mathrm{C1} + \mathrm{C2} \log_2 \left(\frac{\mathrm{D}}{\mathrm{W}+1} \right) \qquad \text{Gleichung 3}$$

$$\mathrm{ID} = \log_2 \left(\frac{\mathrm{D}}{\mathrm{W}+1} \right) \qquad \text{Gleichung 4}$$

$$\mathrm{MeanTime} = \mathrm{C1} + \mathrm{C2}\ \mathrm{ID} \qquad \text{Gleichung 5}$$

Fitts' Law bildet die Grundlage für viele weiter reichende Modelle der Mensch-Maschine-Kommunikation, die auch im Kontext dreidimensionaler virtueller Umgebungen Vorhersagen über die mittleren Ausführungszeiten deiktischer Zeige- und Positionierungsaufgaben ermöglichen.

Besondere Bedeutung hat die von McKenzie und Ware (1993) vorgestellte Erweiterung des Fitts' Law um die vom technischen System verursachten Verzögerungszeiten (engl. *lag, system latency*), die um *C3* gewichtet in die Gleichung eingehen (Gleichung 6, vgl. Abbildung 101).

$$\text{MeanTime} = C1 + (C2 + C3 \times \text{MachineLag})\,\text{ID} \qquad \text{Gleichung 6}$$

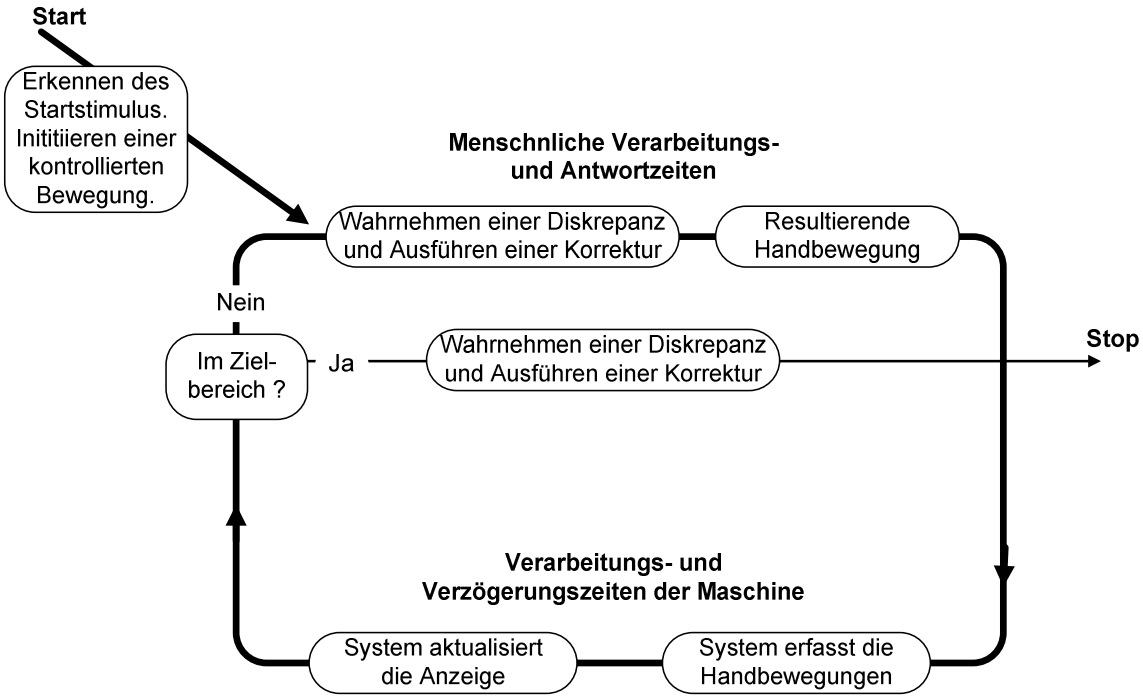


Abbildung 101: Geschlossene Interaktionsschleife (closed-loop) einer Zeigebewegung in einer grafischen Umgebung, die die Verarbeitungsoperationen auf Seiten des Benutzers und der Maschine umfasst (aus Ware & Balakrishan, 1994, S. 334).

In zweidimensionalen Zeigeaufgaben konnten mit dieser Erweiterung mehr als 90 Prozent der Varianz aufgeklärt werden (vgl. MacKenzie & Ware, 1993). Darauf aufbauend stellten Ware und Balakrishan (1994) ein Modell zur Beschreibung dreidimensionaler Zeigebewegungen in VR-Systemen auf (Gleichung 7), in welches zur Bestimmung der Systemverzögerung auch die Länge des Darstellungsintervalls (engl. *frame intervall*) der vom System generierten Einzelbilder einfloss (diese entspricht der Bildwiederholrate^{-1}).

$$\text{MachineLag} = \text{DeviceLag} + \text{FrameInterval} \times 0{,}75 \qquad \text{Gleichung 7}$$

In empirischen Untersuchungen konnten Ware und Balakrishan (1994) mit diesem Modell eine Varianzaufklärung von 95 Prozent erreichen, darüber hinaus stellten sie bei der experimentellen Bestimmung der Konstanten *C1, C2* und *C3* fest, dass die Bewegungen auf den aus egozentrischer Benutzersicht horizontal (X) und vertikal (Y) verlaufenden Achsen gleich schnell, auf der Z-Achse, also vom Benutzer wegführend, jedoch ca. zehn Prozent langsamer ausgeführt wurden. Durch die Verwendung achsenspezifischer Konstantentripel *C1, C2* und *C3* konnte die Varianzaufklärung abermals leicht gesteigert werden (97 bis 98 Prozent). In Widerspruch zu Fitts' Law stellten Ware und Balakrishan fest, dass sobald die zum Zeigen verwendeten Objekte (Cursor) eine räumliche Tiefe aufweisen (hier 0,5 bis 2,0 cm), die Bestimmung des *Index of Difficulty (ID)* über die eindimensionale Entfernung *D* des Cursors vom Ziel die Informationskapazität *C* durch das Modell nicht mehr korrekt beschrieben wird, da sie vergleichsweise gering ausfällt (2,4 bit/s statt 4,3 bit/s bei der Verwendung flacher Objekte). Ware und Balakrishan (1994) schlagen daher vor, für Aufgaben im dreidimensionalen Raum statt der ursprünglich von Fitts im zweidimensionalen Kontext herangezogenen Entfernung *D* und Fläche *W* das Volumen *VO* des Interaktionsobjekts und des Interaktionsraumes *VZ* ins Verhältnis zu setzen (bieten dafür aber keine Konstantentripel *C1, C2*, *C3* an).

Eine weitere Ergänzung des Fitts' Law für dreidimensionale Zeigebewegungen untersuchten Murata und Iwase (2001), indem sie die Richtung der Bewegung mittels des Rotationswinkels θ einbezogen, der die Lage des Ziels im Blickfeld des Betrachters beschreibt (Gleichung 8).

$$\mathrm{ID} = \log_2\left(\frac{\mathrm{D}}{\mathrm{W}+1}\right) + C4\sin\theta$$

Gleichung 8

Verglichen mit dem ursprünglichen eindimensionalen Fitts' Law konnten sie in Studien damit eine höhere Varianzaufklärung erreichen (72 Prozent gegenüber 56 Prozent für *C4*=0,5; zu beachten ist, dass Murata und Iwase die Bildwiederholrate und Systemverzögerungszeiten nicht in die Berechnung des Index of Difficulty einbezogen). In ihren Studien stellten sie weiterhin fest, dass Zeigebewegungen in Richtung der oberen und die benutzerseitig linken Hemisphären signifikant länger dauerten als Zeigebewegungen in die unteren und rechten Hemisphären.

Ware und Rose (1999) betrachteten die Auswirkungen der materiellen Repräsentation des zur Manipulation verwendeten Zeigeobjekts auf die mittlere Bewegungsdauer und beobachteten, dass die Manipulation rein virtueller Objekte ca. 25 Prozent länger dauerte als die rein physisch repräsentierter (s. Kapitel 8 und 9). Diesen Effekt führten Ware und Rose vor allem auf die nicht vorhandene Systemverzögerungszeit in der Manipulation physischer Objekte zurück (vgl. Ware & Rose, 1999).

12.5 Mixed Reality Interaktionstechniken im dreidimensionalen Skizziersystem SketchApp

Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten empirischen Untersuchungen (Studien 2 und 4) wurde ein prototypisches immersives Modelliersystem (Arbeitstitel „SketchApp“) entwickelt, welches zunächst über eine linienbasierte Skizzierfunktion (Abschnitt 12.5.1, S. 283) und eine History Funktion verfügte (Abschnitt 12.5.3, S. 288). Später wurde die Funktionalität des Systems um ein Flächenmodellierwerkzeug zur Extrusion von Bézierkurven (Abschnitt 12.5.2, S. 285) erweitert. Weitere Entwicklungen, wie ein Werkzeug zur Extrusion beliebig freihändig skizzierter Muster wurden konzipiert und stehen in der Entwicklung. Die Konzeption der Interaktionstechniken erfolgte in Kooperation mit Dipl. Des. Christian Zöllner, der auch die Interaktionswerkzeuge gestaltete (vgl. Zöllner, 2007).

Das System wurde auf Basis des verteilten Renderingsystems *renderIt* implementiert, welches auf dem Szenegraphsystem *OpenSG*-basiert (vgl. Neumann et al., 2009). Als Visualisierungssystem kam die VR-CAVE des Fraunhofer IPK Berlin zum Einsatz. Diese verfügt über fünf Rückprojektionsfächen (Abschnitt 4.3.1, Abbildung 26, S. 74). Das Tracking der Benutzer und Interaktionsgeräte erfolgte mittels eines elektromagnetischen Systems („MotionStar“ der Firma Ascension). Die Sensorik der Interaktionsgeräte, der Kraftsensor des Stiftes, der Schieberegler zur Steuerung der History-Funktion und die Schalter in den Bézierwerkzeugen, wurden mit Elementen des Phidget Toolkits realisiert (vgl. Phidgets, 2007). Für zukünftige Implementierungen sind kabellose Varianten vorgesehen, die über optische Trackingverfahren verfügen und funkbasiert arbeiten.

Die mit dem System erstellen Skizzen können im VRML 2.0 Format gespeichert werden. Darüber hinaus ist es möglich, 3D-Modelle in diesem Format einzulesen und zu visualisieren.

Weiterhin werden Algorithmen zur Erstellung von Objekten anhand von Strichskizzen, die bereits erfolgreich in Desktop-basierten Lösungen eingesetzt werden, auf das immersive Skizziersystem übertragen (vgl. Igarashi et al., 1999). Mittelfristig wird eine Integration von Systemen zur Volumenmodellierung (vgl. Lüddemann, 1996; Biahmou Tchebetchou, 2005) und von Systemen zur Modellierung flexibler Objekte (vgl. Völlinger et al., 2009) mit dem Skizziersystem angestrebt.

12.5.1 Stift Werkzeuge

Das Stiftwerkzeug ermöglicht freihändiges Skizzieren im Raum. Es wurde zur Durchführung der Studien in drei Varianten ausgelegt: rein physisch, hybrid physisch/virtuell und rein virtuell (vgl. Abbildung 102, Abbildung 103, Abschnitt 9.4, S. 210). Die folgenden Erläuterungen beziehen sich auf die hybride und physische Variante.

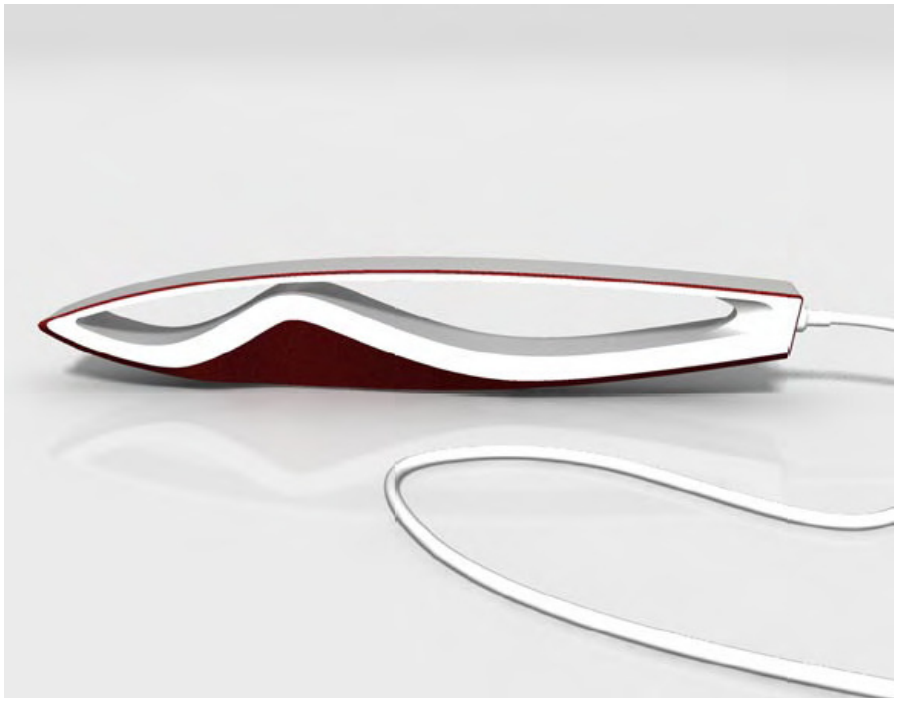


Abbildung 102: Stiftwerkzeug (Konzeptstudie, aus Zöllner, 2007, S. 179).

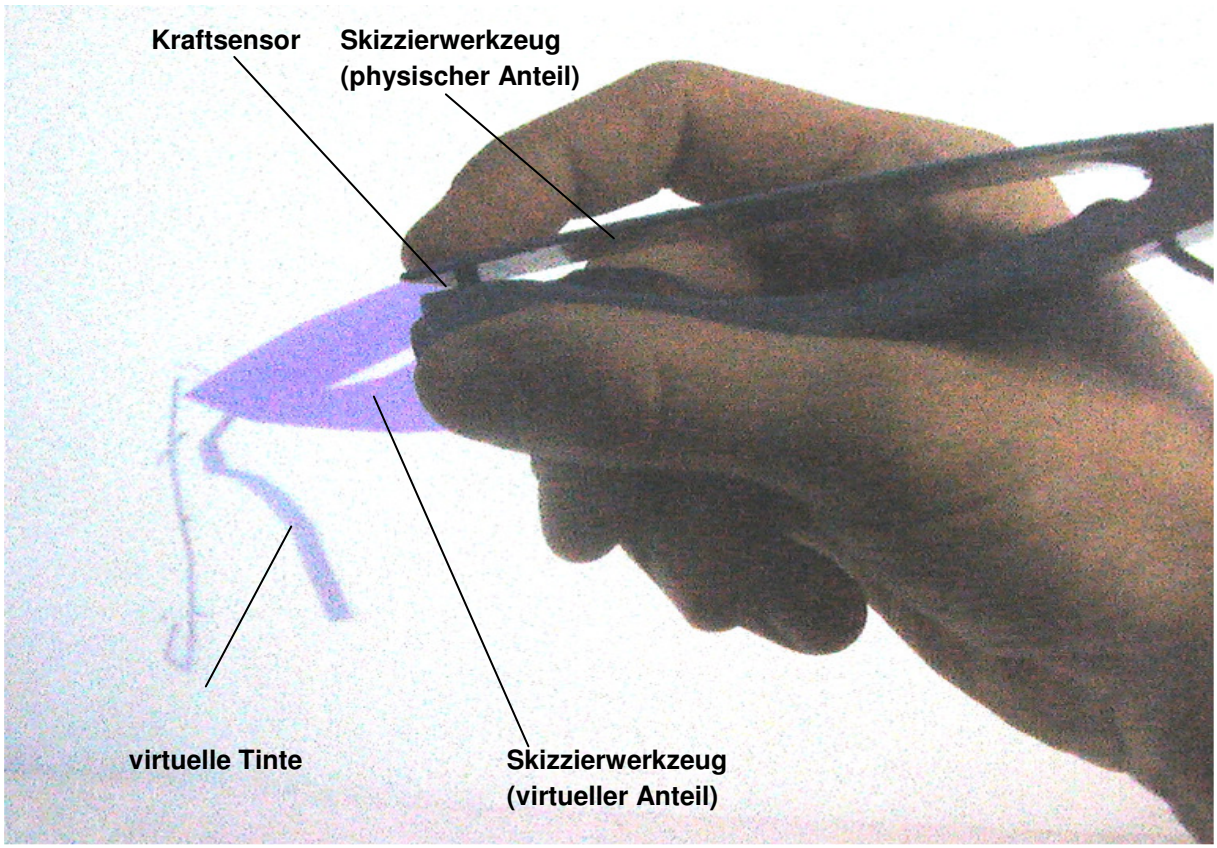


Abbildung 103: Hybrides Skizzierwerkzeug während des Zeichnens.

Um zu zeichnen muss der Anwender auf die obere Seite des Stiftes einen leichten Druck ausüben, bis obere und untere Seite des Stifts aufeinander treffen und ein passives Berührungsfeedback spürbar wird (vgl. Abbildung 104). Durch diese Gestaltung des Stiftes soll das Feedback nachempfunden werden, welches beim Aufsetzen eines Stifts auf ein Blatt Papier auf fester Unterlage entsteht. Im Fall des Interaktionswerkzeugs wird das Feedback jedoch aus dem Werkzeug heraus erzeugt, während es beim analogen Skizzieren durch die Gegenkraft des Mediums generiert wird. Im Moment der Berührung eines im unteren Teil des Stiftes angebrachten Kraftsensors wird „virtuelle Tinte“ im dreidimensionalen Raum abgetragen (vgl. Abbildung 103). Passives haptisches Feedback und Zeichnen der Linie können so vom Benutzer als zusammengehörig empfunden, und eine Verbindung zwischen dem Gebrauch des greifbaren, physischen Stifts sowie seiner Wirkung im virtuellen Raum hergestellt werden.

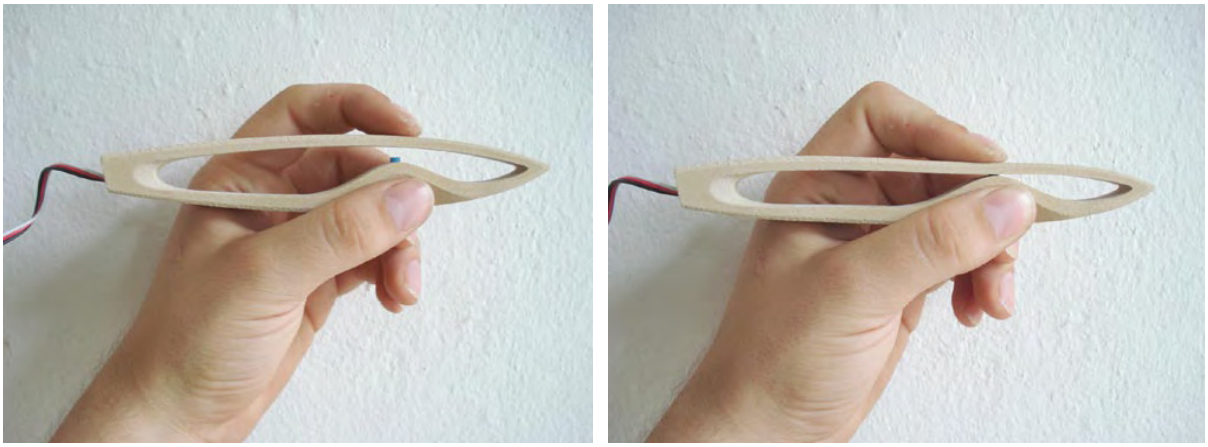


Abbildung 104: Handhabung des Stiftwerkzeugs, Auslösen der Skizzierfunktion (aus Zöllner, 2007, S. 194).

Die „virtuelle Tinte“ wird direkt an der Spitze des Stiftes abgetragen und folgte der Bewegung des Stiftes (und der Hand des Benutzers), welche durch die Positionssensoren des Trackingsystems ermittelt wird. Die „virtuelle Tinte“ hat die Form eines blauen Streifens, ähnlich der Spur eines „Textmarkers“. Die Breite des Striches wird in Abhängigkeit von der Kraft, mit der die Benutzer auf den oberen Bogen des Stiftes drücken, zwischen einem und acht Millimeter skaliert. Der verwendete Kraftsensor entstammt dem Phidgets Toolkit und kann die einwirkende Kraft in 1024 Abstufungen diskriminieren (vgl. Phidgets, 2007).

12.5.2 Bézierwerkzeug

Das Bézierwerkzeug ermöglicht dem Benutzer, Bézierkurven im Raum zu extrudieren und Flächen zu erzeugen (vgl. Abbildung 105, Abbildung 106). Das Bézierwerkzeug ist als Werkzeugpaar zum zweihändigen Gebrauch realisiert, bestehend aus einer virtuell repräsentierten Kurve und zwei physischen Griffen, in die jeweils ein Schalter eingelassen ist (die Schalter entstammen dem Phidget Interface Kit, vgl. Phidgets, 2007).

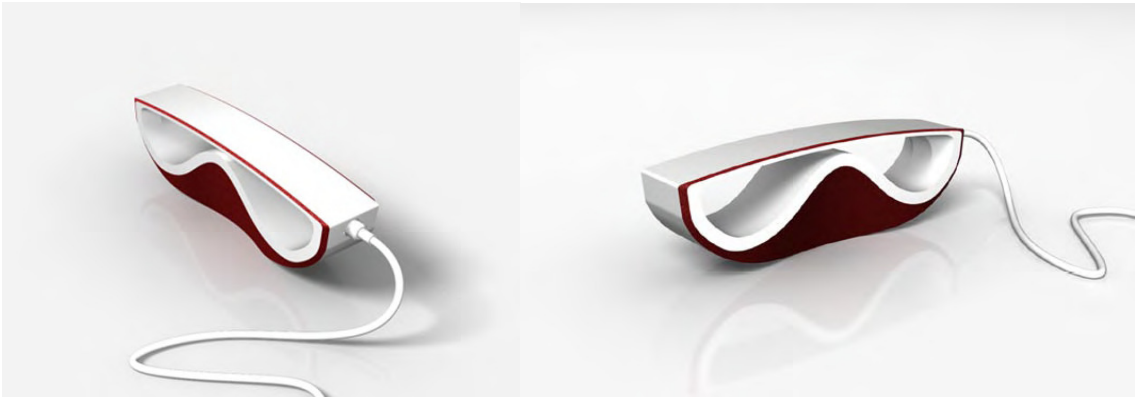


Abbildung 105: Bézierwerkzeug (Konzeptstudie, aus Zöllner, 2007, S. 183).

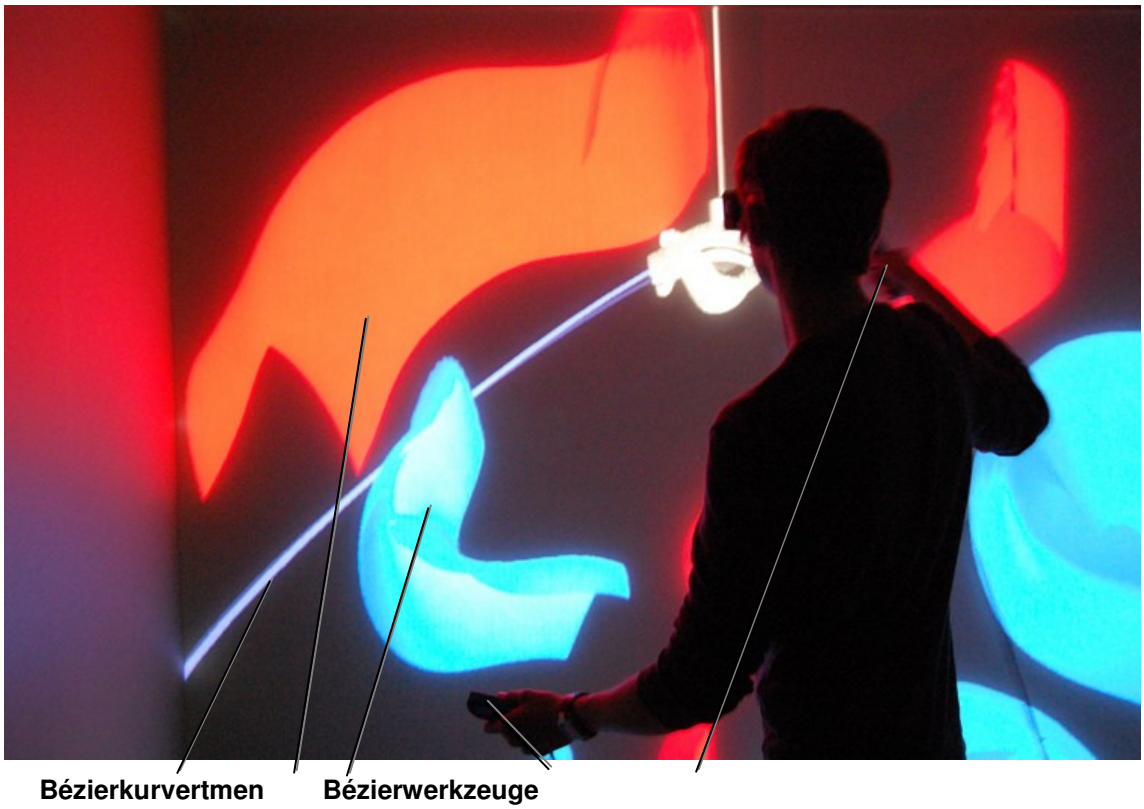


Abbildung 106: Bézierwerkzeug während des Modellierens (der sichtbare Versatz zwischen der Bézierkurve und den Interaktionswerkzeugen resultiert aus den unterschiedlichen Positionen der Kamera und des Anwenders).

Bézierkurven sind parametrisierte Kurven, die durch *m* Kontrollpunkte definiert werden, welche ein Kontrollpolynom definieren (vgl. Abbildung 107). Der Grad *n* einer Bézierkurve ergibt sich aus der Anzahl der Kontrollpunkte *m-1*. Das implementierte Bézierwerkzeug basiert auf einer kubischen Bézierkurve ($n = 3$), deren Kontrollpolynom sich ergibt zu:

$$Q(t) = (1-t)^3 P_0 + 3t (1-t)^2 P_1 + 3t^2 (1-t) P_2 + t^3 P_3$$ Gleichung 9

$Q(t)$ Punkt der Bézierkurve in Abhängigkeit vom Parameter t, mit $t \in [0,1]$

P_i Kontrollpunkt i der Bézierkurve

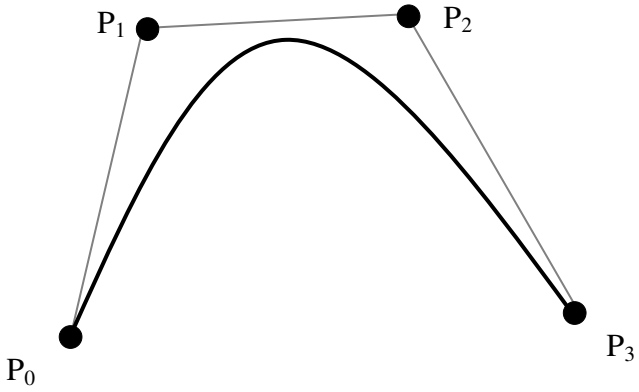


Abbildung 107: Kubische Bézierkurve (nicht maßstäblich).

Die Positionen der Kontrollpunkte P_0 und P_1 sowie P_2 und P_3 werden jeweils durch die Position eines physischen Griffs kontrolliert (vgl. Abbildung 108). Die Abstände der Kontrollpunkte P_0 und P_1 sowie P_2 und P_3 sind auf je 30 cm festgelegt und können vom Benutzer nicht verändert werden.

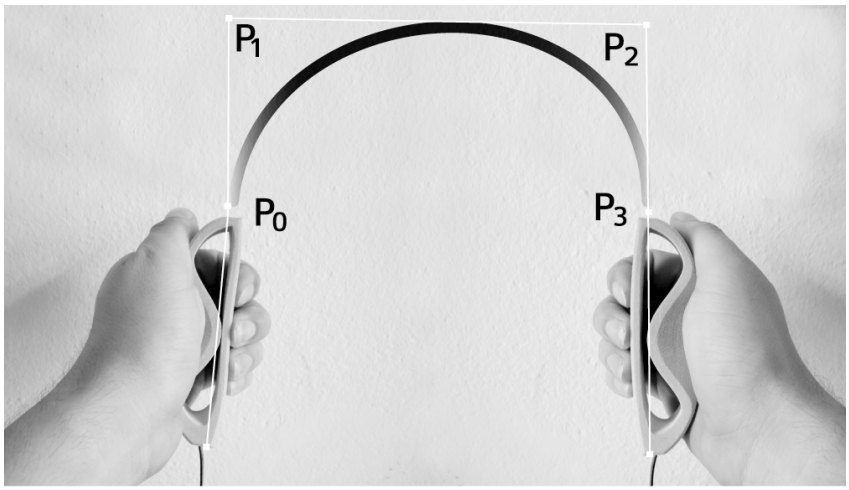


Abbildung 108: Steuerung der Kontrollpunkt des Bézierwerkzeugs (nicht maßstäblich).

Das Werkzeug kann vom Benutzer frei im Raum bewegt werden; die als virtuelles Band repräsentierte Kurve folgt dabei wie beschrieben der Position der Griffe. Um die Kurve in den Raum zu extrudieren, muss der Benutzer beide Griffe leicht zusammendrücken, so dass die im Werkzeug eingelassenen Schalter ausgelöst werden. Die Kurve wird nun der Bewegung der Griffe folgend im Raum extrudiert, bis der Benutzer das Werkzeug lockert und der Schalter gelöst wird (vgl. Abbildung 109).

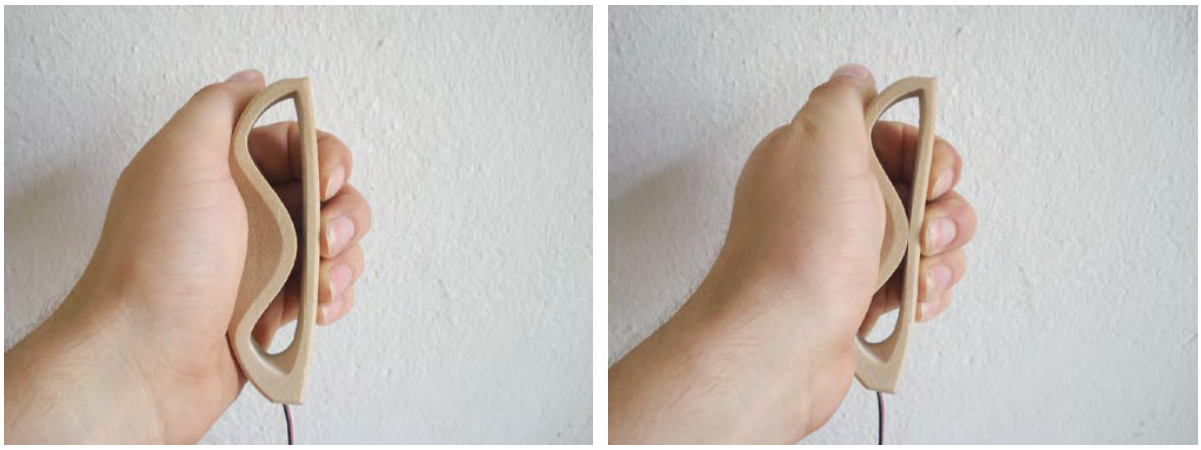


Abbildung 109: Handhabung des Bézierwerkzeugs, Auslösen der Extrudierfunktion (aus Zöllner, 2007, S. 196).

12.5.3 History Funktion

Um Skizzierschritte rückgängig zu machen (Undo-Funktion) und die Entstehungshistorie der Skizze visualisieren zu können, steht den Anwendern eine History Funktion zur Verfügung. Diese ist an einen physischen Schieberegler geknüpft, der außerhalb der CAVE auf einem Tisch angebracht ist (der Schieberegler wurde wiederum über das Phidget Interface Kit eingebunden, vgl. Phidgets, 2007).

Wird der Regler in Richtung der Ausgangsstellung geschoben, werden die Skizzenelemente in umgekehrter Reihenfolge ihrer Entstehung sequentiell ausgeblendet. Befindet sich der Regler in der Ausgangsstellung, ist der Skizzierraum geleert. Schiebt der Benutzer den Regler wieder in Richtung der Endstellung, werden die Skizzenelemente wiederum sequentiell eingeblendet (Replay-Funktion). Durch Hin- und Herbewegen des Reglers kann der Entstehungsprozess der Skizze nachvollzogen werden (Replay-Funktion).

Entscheidet sich der Anwender, Teile oder die gesamte Skizze zu löschen, bewegt er den Regler entsprechend, bis alle zu löschenden Anteile ausgeblendet wurden, und beginnt erneut zu skizzieren. Sobald das System neue Skizzierhandlungen registriert, werden alle bis dahin unsichtbar im Speicher (dem Szenegraphen) verbliebenen Anteile gelöscht.

Mit der History Funktion wurde eine Anforderung Shneidermans an kreativitätsunterstützende Werkzeuge umgesetzt, dem Anwender zur Reflektion seines Arbeitsprozesses und zur Unterstützung der Kommunikation in Arbeitsgruppen eine Möglichkeit einzuräumen, den Verlauf seiner Arbeitssitzung nachträglich wiedergeben bzw. abspielen zu können („Reviewing and Replaying Session Histories"; vgl. Shneiderman, 1999).

12.5.4 Methode zur Glättung des magnetischen Trackingverfahrens

Positions- und Orientierungsdaten, die mittels magnetischer Trackingsysteme gewonnen werden, sind häufig verrauscht. Für immersive Modelliersysteme stellt dies eine besondere Herausforderung dar, da die Trackingdaten zur Erzeugung geometrischer Formen genutzt werden. Häufig werden daher Verfahren zur Glättung eingesetzt, die die Störungen (das Rauschen) aus den Positionsdaten herausfiltern.

Im Rahmen des vorgestellten Skizziersystems wurde die Glättungsfunktion aus Gleichung 10 implementiert, die als Tiefpassfilter fungiert.

$$g_0 = p_0$$
$$g_i = (1 - x)\, g_{i-1} + x\, p_i$$

Gleichung 10

p_i	Ortsvektor des getrackten Objekts, ungefiltert
g_i	Ortsvektor des getrackten Objekts, gefiltert
x	Glättungsfaktor

Zur Ermittlung der geglätteten Position des getrackten Objekts, bzw. dessen geglätteten Ortsvektors g_i, wird die aktuell vom Trackingsystem gelieferte, ungefilterte Position des getrackten Objekts, bzw. dessen Ortsvektor p_i, mit einem Faktor *x* gewichtet und mit dem zum letzten Zeitpunkt berechneten geglätteten Ortsvektor g_{i-1} addiert, der mit Faktor (1- *x*) gewichtet wird (vgl. Abbildung 110).

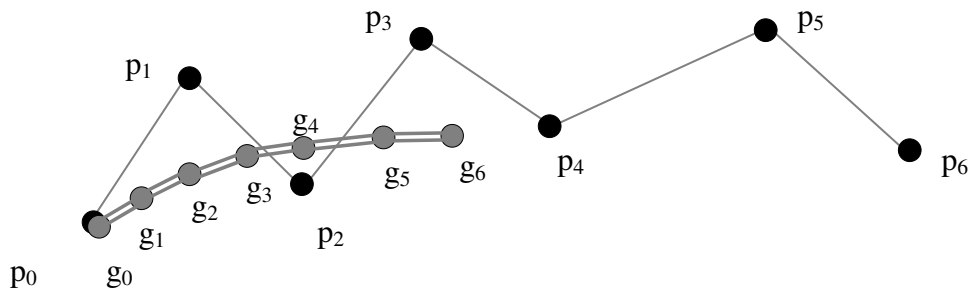


Abbildung 110: Vom Trackingsystem ermittelte Positionsdaten (Ortsvektoren p_i) und geglättete Positionsdaten (Ortsvektoren g_i; nicht maßstäblich).

Unter den beschriebenen technischen Randbedingungen wurde als Gewichtungsfaktor aufgrund subjektiver Bewertung der Skizzengüte ein optimaler Wert von $x = 0{,}1$ ermittelt. Der Einsatz der Glättungsfunktion ergibt deutlich gleichmäßigere Strichskizzen und Flächen (vgl. Abbildung

111), führt jedoch auch zu einer wahrnehmbaren Verzögerung zwischen Bewegung des Skizzierwerkzeugs und resultierender Strich- bzw. Flächenerzeugung.

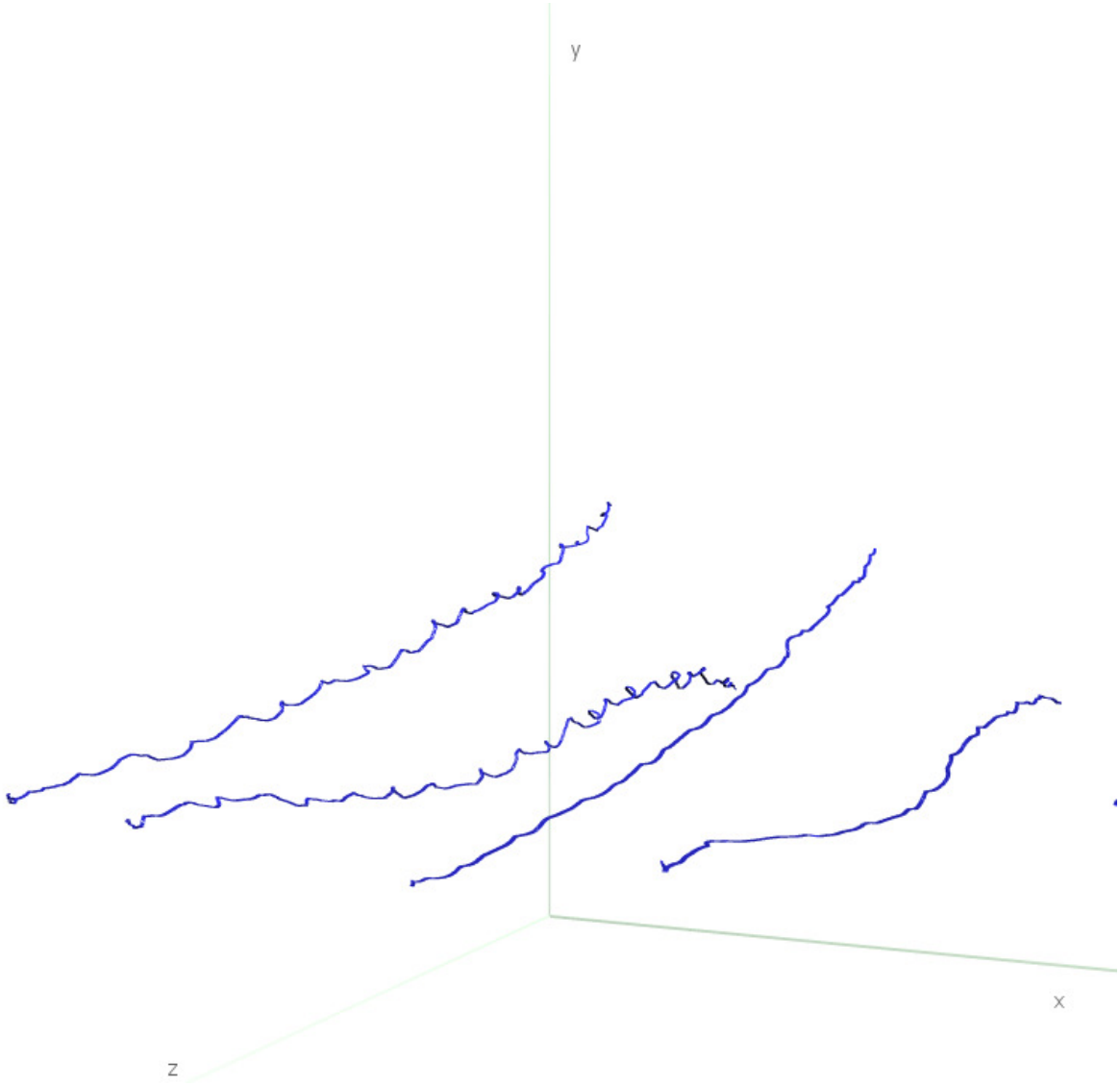


Abbildung 111: Ungefilterte, vom Trackingsystem ermittelte Positionsdaten (im Bild erster und zweiter Streifen von links) und mit Glättungsfaktor x=0,1 gefilterte Positionsdaten (im Bild erster und zweiter Streifen von rechts).

12.6 Auswertungsmethoden

12.6.1 Skalenniveaus und Standardauswertungsmethoden

Die in empirischen Untersuchungen erhobenen Daten (Variablen) werden anhand ihrer Merkmalsausprägungen unterschiedlichen Skalenniveaus zugeordnet. Das Skalenniveau einer Variable bestimmt die für die Hypothesenprüfung anwendbaren Auswertungsmethoden. Tabelle 25 listet die wichtigsten Skalenniveaus auf (vgl. Bortz, 2005, S. 18ff).

Tabelle 25: Typische Skalenniveaus empirischer Daten (nach Bortz, 2005, S. 23 und 798).

Skalenniveau		mögliche Aussagen / Operationen	Beispiel	Zentrale Tendenz („Mitte", „Zentrum")
(kategoriale Merkmale)	Nominalskala	Gleichheit, Verschiedenheit	Telefonnummern, Geschlecht	Modalwert
	Ordinalskala	Rangordnungen (größer, kleiner)	Schulnoten, Windstärken	Median
Kardinalskalen *(metrische Merkmale)*	Intervallskala	Die Rangordnungsunterschiede zwischen zwei Elementen entsprechen ihrer Differenz.	Temperatur, Zeit	arithmetisches Mittel
	Verhältnisskala	Nullpunkt	Gewichtsmessung, Längenmessung	arithmetisches Mittel

Zur Hypothesenprüfung (Abschnitt 7.7, S. 156) wurden für die Studien 2 bis 4 folgende Standardauswertungsmethoden verwendet:

Wilcoxon-Signed-Ranks-Test: Dieser Test ist ein Signifikanztest zur Untersuchung eines Merkmals zweier unabhängiger Gruppen. Dieser Test ist für ordinalskalierte Merkmale definiert und vergleicht den Median des Merkmals beider Gruppen. Er ist verteilungsfrei, das heißt er lässt sich auch auf Daten anwenden, die nicht normalverteilt vorliegen (vgl. Bortz, 2005, S. 153f). In dieser Arbeit wurde der Friedman-Test z. B. in der Studie 2 verwendet, um den selbstentwickelten Fragebogen zum Skizzierprozess (Abschnitt 7.3.1, S. 147) in den Bedingungen 2D- und 3D-Freiheitsgrad zu vergleichen.

Friedman-Test: Dieser Signifikanztest untersucht Merkmale von drei oder mehr unabhängigen Gruppen (vgl. Sheskin, 2007). Er ist ebenso wie der Wilcoxon-Signed-Ranks-Test verteilungsfrei und für ordinalskalierte Merkmale definiert, d. h. es werden die Mediane der Gruppen verglichen. Dieses Verfahren sortiert dazu die Messwerte jeder Bedingung und ermittelt, ob sich die Rangreihenfolge mindestens einer Gruppe signifikant von der Rangreihenfolge der anderen Gruppen unterscheidet. In dieser Arbeit wurde der Friedman-Test z. B. in der Studie 4 verwendet, um den selbstentwickelten Fragebogen zum Skizzierprozess (Abschnitt 7.3.1, S. 147) in den Bedingungen physische, virtuelle und hybride Repräsentation zu vergleichen.

Einfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) mit Messwiederholung: Dieses Verfahren untersucht den Einfluss eines Faktors auf ein metrisch skaliertes Merkmal, welches bei jeder Versuchsperson mehrfach gemessen wird (vgl. Bortz, 2005; Bortz & Döring, 2006). Dazu wird die Varianz[1] des Merkmals mittels eines F-Tests ermittelt und überprüft, ob diese zwischen den Gruppen größer ist als innerhalb einer Gruppe. Darüber wird ein p-Wert ermittelt, der Aufschluss darüber gibt, ob der Einfluss des Faktors einen signifikanten Einfluss auf das Merkmal ausübt. In dieser Arbeit wurde die einfaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholung z. B. in der Studie 3 verwendet, um die Genauigkeit und Geschwindigkeit der Lösung der Positionierungs- und Rotationsaufgaben (Abschnitt 8.7, S. 188) in den Bedingungen physische, virtuelle und hybride Repräsentation zu vergleichen.

McNemar-χ^2-Test (*McNemar-Chi-Quadrat-Test):* Dieser Signifikanztest untersucht die Häufigkeiten eines dichotomen, d. h. zweifach ausgeprägten Merkmals, welches in einer Messwiederholung bei jeder Versuchsperson zweifach gemessen wird (vgl. Bortz, 2005, S. 159). Es wird dabei ein p-Wert für die Wahrscheinlichkeit bestimmt, mit der die Häufigkeit des Merkmals vom variierten Faktor bestimmt wird. In dieser Arbeit wurde der McNemar-χ^2-Test z. B. in der Studie 2 verwendet, um die Häufigkeiten der Antworten auf die offenen Fragen des Fragebogens, welche zuvor dem Kategorienschema zugeordnet wurden (Abschnitt 7.8.3, S. 161), in den Bedingungen 2D- und 3D-Freiheitsgrad zu vergleichen.

Cochran-Q-Test: Dieser Test untersucht ebenso wie der McNemar-χ^2-Test die Häufigkeiten dichotom ausgeprägter Merkmale, kann jedoch auch auf mehr als zwei Messwiederholungen angewendet werden (vgl. Bortz, 2005, S. 161). In dieser Arbeit wurde der Cochran-Q-Test z. B. in der Studie 4 verwendet, um die Häufigkeiten der Antworten auf die offenen Fragen des Fragebogens, welche zuvor dem Kategorienschema zugeordnet wurden (Abschnitt 9.7.5, S. 220), in den Bedingungen physische, virtuelle und hybride Repräsentation zu vergleichen.

12.6.2 Auswertungsmethode Gemischtes Lineares Modell

Das in den Studien 2 und 4 gewählte Versuchsdesign entsprach einem mehrfaktoriellen Versuchsdesign in der Variante eines *lateinischen Quadrats*. Dieses stellt „(...) eine besondere Variante unvollständiger Versuchpläne [dar]“ (Bortz, 2005, S. 396), da hier nicht jeder Teilnehmer alle Kombinationen der Faktoren durchläuft[2]. Lateinische Quadrate können, wie in Abschnitt 7.6 (S. 156) erwähnt, nur angewendet werden, wenn man „theoretisch rechtfertigen kann oder aufgrund von Voruntersuchungen weiß, dass Interaktionen [zwischen den Faktoren] unwahrscheinlich sind“ (Bortz, 2005, S. 396).

Solche Interaktionen sind in den Studien 2 und 4 jedoch theoretisch möglich. So könnten Aufgaben unbeabsichtigt besonders gut auf eine spezifische Versuchsbedingung (einen Freiheitsgrad, einen Stift) zugeschnitten sein. Auch wäre es möglich, dass sich ein Reihenfolgeneffekt einstellt, dass es beispielsweise besonders günstig ist, zuerst die 3D- und dann 2D-Bedingung (in Studie 2) bzw. zuerst den physischen, dann den virtuellen und zuletzt den hybriden Stift zu nutzen (in Studie 4). Außerdem müssen Zufallseffekte (engl. *random effects*) ausgeschlossen werden, die durch die Versuchsplanung nicht beeinflusst werden können. Dazu gehören beispielsweise die zufällige

---

[1] Die Varianz ist ein Maß dafür, wie stark ein Merkmal „streut“.

[2] Die Faktoren der Studie 2 sind *Aufgabe* und *Dimension*, die Faktoren der Studie 4 sind *Aufgabe* und *Repräsentation.*

Verteilung der Teilnehmer auf die Gruppen und die sich dadurch zufällig ergebenden Erfahrungsverteilungen in beiden Gruppen.

Gemischte Lineare Modelle (vgl. Fox, 2002; Fahrmeir et al., 2007) ermöglichen es, für metrisch skalierte Merkmale individuen- oder gruppenspezifische Effekte zu modellieren und Interaktionen zwischen den Faktoren zu überprüfen. Zur Hypothesenüberprüfung mittels Gemischter Linearer Modelle muss das in Gleichung 11 dargestellte Gleichungssystem gelöst (bzw. geschätzt) werden, so dass sich letztlich für jeden Effekt eine Irrtumswahrscheinlichkeit p_e bezüglich der Hypothesen ergibt.

In dieser Arbeit wurden Gemischte Lineare Modelle in den Studien 2 und 4 z. B. für die Auswertung der Aufzeichnungen des Benutzerverhaltens (wie Geschwindigkeit und Skizzierdauer, Abschnitt 7.3.3, S. 148), der Skizzeneigenschaften (wie Volumen, Größe und Detailgrad, Abschnitt 7.3.4, S. 148) und der hedonistischen und pragmatischen Eigenschaften[1] (Abschnitt 7.3.1, S. 147) genutzt. Zur Lösung der Modelle wurde in diesen Studien die Statistiksoftware SPSS in Version 17.0 genutzt. Die Zuordnung der Variablen der Studien zu den Parametern des Gemischten Linearen Modells zeigt Gleichung 11.

[1] Hedonistische und pragmatische Eigenschaften wurden mittels des AttrakDiff Fragebogens erhoben, für den ein metrisches Datenniveau angenommen werden kann (Abschnitt 7.3.1, S. 146).

$$y_i = X_i\beta + Z_i b_i + \varepsilon_i, \qquad i = 1, ..., m$$ Gleichung 11

m Anzahl der Individuen

y_i Vektor der Beobachtungsergebnisse für Individuum *i*

Dieser Vektor enthält die ermittelten Werte der abhängigen Variablen (Studie 2, Abschnitt 7.3, S. 147 und Studie 4: Abschnitt 9.3, S. 209).

β Vektor der Koeffizienten der festen Effekte

Dieser Vektor enthält für jede unabhängige Variable einen Koeffizienten. Um einen Effekt zu prüfen, muss das Gleichungssystem für den entsprechende Koeffizient $\beta_e = 0$ gelöst werden (vgl. Fahrmeir et al., 2007, S. 266f).

Der Vektor β ist in Studie 2 zweidimensional (2D-, 3D-Bedingung), und in Studie 4 dreidimensional (P-, H-, V-Repräsentation).

X_i Modellmatrix der festen Effekte der Beobachtungen für Individuum *i* (sog. β-Gewichte).

Diese Matrix wird bei der Lösung des Gleichungssystems bestimmt.

b_i Vektor der Koeffizienten der Zufallseffekte für Individuum *i*

Hier erfolgt die Kodierung der Zugehörigkeit eines Individuums zu einer Gruppe.

Studie 2: zwei Gruppen (Abschnitt 7.6, S. 156),
Studie 4: sechs Gruppen (Abschnitt 9.5, S. 212)

Da b nur für binäre Elemente definiert ist, erfolgte für die Auswertung der Studie 4 eine manuelle Umcodierung der Gruppenzugehörigkeit in fünf Variablen (vgl. Dummycodierung, Bortz, 2005, S. 484).

Z_i Modellmatrix der zufälligen Effekte der Beobachtungen von Gruppe *i*

Diese Matrix wird bei der Lösung des Gleichungssystems bestimmt.

ε_i Vektor der Beobachtungsfehler der Beobachtungen von Gruppe *i*

12.6.3 Symbolverzeichnis

df	Freiheitsgrad; Anzahl der frei variierbaren Werte eines Kennwerts
f	Frequenz (Häufigkeit) eines Merkmals
$F(df_Z, df_N)$	Ergebnis des F-Tests, auf dessen Basis eine Irrtumswahrscheinlichkeit berechnet werden kann. df_Z und df_N geben die Freiheitsgrade der verglichenen Stichproben an.
IQR	Interquartilsabstand (engl. *interquartile range*) eines ordinal skalierten Merkmales, in dem 50% aller Messwerte liegen
M	arithmetischer Mittelwert eines metrischen Merkmals
Median	derjenige Wert einer Verteilung ordinal skalierter Merkmale, der die Gesamtzahl der Fälle halbiert
η^2	Effektgröße (auch Varianzaufklärung); praktische Bedeutsamkeit eines Stichprobenergebnisses
p	Irrtumwahrscheinlichkeit, bei einer statistischen Entscheidung zugunsten der Hypothese (H_1) zu entscheiden, obwohl die gegenteilige Nullhypothese (H_0) in der Population gilt (Abschnitt 7.7, S. 156)
Q(df)	Ergebnis eines Cochran-Q-Tests, aus dem die Irrtumswahrscheinlichkeit abgeleitet werden kann
SD	Standardabweichung des Mittelwerts eines metrischen Merkmals
Wald Z	Ergebnis des Wald Z-Tests auf Einflüsse von Zufallseffekten bei der Auswertung Gemischter Linearer Modelle
$\chi^2(df)$	Ergebnis eines χ^2-Tests, aus dem die Irrtumswahrscheinlichkeit abgeleitet werden kann (auch Friedman-Tests)

12.7 Material der Studie 1: Fokusgruppen

12.7.1 Fragebogen zur Vorbefragung der Teilnehmer

Fragebogen zur Focus Group Expertendiskussion "Mixed Reality Interaktionstechniken für die frühen Phasen der Formgestaltung in der Möbelindustrie"

Wir möchten Sie bitten diesen Fragebogen ausgefüllt zur Focus Group mitzubringen. Ihre Antworten werden anonym behandelt. Wenn Sie bestimmte Fragen nicht beantworten wollen, lassen sie diese einfach frei.

Ausbildung, erlernter Beruf:_____

Berufserfahrung: _____Jahre

Ausgeübter Beruf: _____

1. Welche CAD-Software kennen und benutzen Sie?

Unigraphics

Kenne ich… o sehr gut o gut o nur vom Namen o gar nicht

Falls Sie die Software kennen, wie zufrieden sind Sie?

Mit **Unigraphics** bin ich… o sehr zufrieden o zufrieden o weder noch
o unzufrieden o völlig unzufrieden

Pro Engineer

Kenne ich… o sehr gut o gut o nur vom Namen o gar nicht

Falls Sie die Software kennen, wie zufrieden sind Sie?

Mit **Pro Engineer** bin ich… o sehr zufrieden o zufrieden o weder noch
o unzufrieden o völlig unzufrieden

Catia

Kenne ich… o sehr gut o gut o nur vom Namen o gar nicht

Falls Sie die Software kennen, wie zufrieden sind Sie?

Mit **Catia** bin ich… o sehr zufrieden o zufrieden o weder noch
o unzufrieden o völlig unzufrieden

<u>AutoCAD</u>

Kenne ich… o sehr gut o gut o nur vom Namen o gar nicht

Falls Sie die Software kennen, wie zufrieden sind Sie?

Mit **AutoCAD** bin ich… o sehr zufrieden o zufrieden o weder noch
o unzufrieden o völlig unzufrieden

Weitere CAD-Software:___________

Kenne ich… o sehr gut o gut o nur vom Namen o gar nicht

W*ie zufrieden sind Sie mit der Software?*

Damit bin ich… o sehr zufrieden o zufrieden o weder noch
o unzufrieden o völlig unzufrieden

Weitere CAD-Software:___________

Kenne ich… o sehr gut o gut o nur vom Namen o gar nicht

W*ie zufrieden sind Sie mit der Software?*

Damit bin ich… o sehr zufrieden o zufrieden o weder noch
o unzufrieden o völlig unzufrieden

Weitere CAD-Software:___________

Kenne ich… o sehr gut o gut o nur vom Namen o gar nicht

W*ie zufrieden sind Sie mit der Software?*

Damit bin ich… o sehr zufrieden o zufrieden o weder noch
o unzufrieden o völlig unzufrieden

Weitere CAD-Software:___________

Kenne ich… o sehr gut o gut o nur vom Namen o gar nicht

W*ie zufrieden sind Sie mit der Software?*

Damit bin ich… o sehr zufrieden o zufrieden o weder noch
o unzufrieden o völlig unzufrieden

2. Wie viele Skizzen eines Möbelstücks fertigen Sie in den frühen Phasen der Formgestaltung an?

ca. ______ Handskizzen

ca. ______ 2D-CAD-Modelle

ca. ______ 3D-CAD-Modelle

ca. _____ _____

ca. _____ _____

ca. _____ _____

3. Wie hoch ist die Komplexität der von Ihnen entwickelten Möbelentwürfe in den frühen Phasen der Formgestaltung?

_____

_____

_____

_____

4. Welches sind Ihre Haupttätigkeiten beim Entwerfen in den frühen Phasen der Formgestaltung (z. B. Zeichnen, Radieren, Drehen, Messen, 3D-Objekte erzeugen…)?

_____

_____

_____

6. Wie viel Zeit verbringen Sie in einer typischen Arbeitswoche durchschnittlich mit Entwurfstätigkeiten?

O 100% (ca. 8 h tägl.) O 75% (ca. 6 h tägl.) O 50% (ca. 4 h tägl.)

O 25% (ca. 2 h tägl.) O > 25% (> als 2 h tägl.)

7. Welches sind Ihre typischen Konstruktionsaufgaben? Was konstruieren Sie typischer Weise?

_____

_____

_____

_____

8. Welche Computereingabegeräte benutzen Sie?

O Computermaus

O Grafiktablett

O _____

O _____

O _____

O _____

Vielen Dank, wir freuen uns auf Sie!

12.7.2 Halbstrukturierter Leitfaden der Fokusgruppen

Einleitung:

- Selbstvorstellung der Moderatoren
- Kurzvorstellung des Forschungsprojektes „Mixed Reality Interaktionstechniken für die frühen Phasen der Formgestaltung“
- Möbeldesign als Beispieldomäne
- Die Ergebnisse der heutigen und folgenden Diskussionen werden in die Arbeit einfließen und sollen umgesetzt werden.

Einleitung formal:

- Dauer: zwei Stunden, falls für einige Punkte etwas mehr Raum gebraucht wird, maximal drei Stunden
- Mitgebrachte Fragebögen einsammeln, sie werden im Nachgang der Diskussion ausgewertet
- Erklärungen zum Datenschutz einsammeln, gibt es dazu Fragen?
- Anreiseaufwände am Ende auszahlen

Einleitung inhaltlich:

- zu Beginn kurz erläutern, warum die Teilnehmer eingeladen wurden
- Wir führen heute hier am Fraunhofer Institut diese Gruppendiskussion mit Ihnen durch um Ihre Meinung zu neuen Möglichkeiten der Gestaltung von Möbeln erfahren
- Augenmerk soll auf den frühen Phasen der Produktgestaltung und Formgebung liegen
- Augenmerk insbesondere auf dem Skizzieren

Einleitung technischer Hintergrund:

- In Industrie und Forschung existieren seit einiger Zeit Konzepte, die Interaktion zwischen Mensch und Computer durch neue Techniken anzureichern um insbesondere die Kreativität und Ausdrucksvielfalt des Menschen zu unterstützen.
- Diese Techniken heißen beispielsweise Tangible Interaction, Augmented Reality, Ubiquitous Computing, das ist in dieser Runde aber nicht wichtig
- Diese möchten wir hier im Fraunhofer Institut IPK entwickeln und dazu Ihre Meinung einholen. Da Sie die Experten und potenziellen Nutzer auf diesem Gebiet sind.

Erinnerung: Fokus der Diskussion liegt auf:

- den frühen (ersten) Phasen der Formgebung für Möbel,
- dem Skizzieren,
- der Visualisierung von Ideen,
- der kreative Umsetzung von Ideen,
- dem Nutzen der menschlichen Ausdrucksmöglichkeiten und –stärken.

Einleitung Motivation:

- Es interessieren Erfahrung und die Einschätzung von jedem im Raum ,
- antworten Sie einfach alle zu jeder Frage,
- holen sie gerne auch breiter aus,
- diskutieren Sie miteinander,
- knüpfen Sie auch gerne an die Aussage von jemand anderem an, wenn Ihnen spontan etwas dazu einfällt.
- Wir beide werden lediglich dafür sorgen, dass jeder zu Wort kommt, jeder genügend Zeit hat, seine Meinung zu äußern und des Weiteren werden wir Ihre Antworten sammeln.
- Wir werden uns jedoch nicht inhaltlich an der Diskussion beteiligen, da es ja um Ihre Gedanken geht.
- Wir zeichnen die Gruppendiskussion auf Video auf, da wir so schnell nicht mitschreiben können.
- Jetzt freuen wir uns über jede Information und Meinung, nehmen Sie also kein Blatt vor den Mund.

(Der folgende Ablauf der Fokusgruppe wird den Teilnehmern auf einem Flipchart präsentiert.)

Vorstellungsrunde:

- Vorschlag: jeder aus der Runde stellt sich vor und schildert seine Aufgaben und sein Tätigkeitsfeld.

Frage 1: Als erstes interessiert mich, welche Funktion das Skizzieren für Sie hat?

Frage 2: Und: Was machen Sie, wenn Sie Möbel skizzieren?

Ggf. Frage 3: Was machen Sie, wenn Sie Möbel skizzieren? Ich meine den Prozess.

- Ggf. spätere Nachfrage:
  - Gibt es eine bestimmte Reihenfolge oder einen ritualisierten Prozess, nach dem sie beim Entwerfen von Möbeln vorgehen?
  - Wenn ja, könnten Sie diesen kurz schildern?

Stimulus: Es wird als Stimulus eine Videoprojektion zum Möbeldesign im virtuellen Raum gezeigt (vgl. Frontdesign, 2006). Dieser ca. fünfminütige Videoclip zeigt immersives linienbasiertes Skizzieren von Möbeln in einer Videocollage. Die Anwender tragen in diesem Video keine technischen Hilfsmittel (Datenbrillen, Shutterbrillen o. ä.).

Frage 4: Es gibt neue technische Möglichkeiten, um im dreidimensionalen Raum skizzieren zu können. Diese möchten wir hier im Fraunhoferinstitut entwickeln und dazu Ihre Meinung einholen, da Sie die Experten und potenziellen Nutzer auf diesem Gebiet sind.

Frage 5: Was ist für Sie der Unterschied zwischen dem Skizzieren in 2D und in 3D?

Frage 6: Angenommen man könnte im (virtuellen) Raum Möbel skizzieren. Welche Funktionen bräuchte man dann um diese 3D-Skizzen zu erstellen? (Z. B. Zeichnen, Ziehen, Strecken, Kratzen.)

- (Die Frage 6 wird als Gedächtnisstütze auf dem Flipchart festgehalten.)
- Jeder von Ihnen erhält jetzt drei Moderationskarten und einen Stift und soll darauf drei Funktionen, die beim Skizzieren im 3D nützlich wären, notieren.
- Ggf. Nachfragen zur Motivation:
  - Versetzen wir uns in das Jahr 2060. Neue Systeme, die die kreative Freiheit und Ausdrucksstärke des Menschen beim Skizzieren unterstützen, sind entwickelt worden. Uns interessiert insbesondere: Welche Funktionen gibt es, welche gibt es nicht mehr?
  - Was kann man mit diesen Systemen alles, was vorher nicht möglich war?
  - Was ist verbessert worden?

(Die Karten werden eingesammelt und in enger Interaktion zwischen Moderatoren und Teilnehmern nach Ähnlichkeiten an einer Metaplanwand geclustert; den Clustern werden Namen zugeteilt.)

Frage 7: Welche Instrumente könnten diese Funktionen vereinen?

- Was für ein Instrument könnte das sein? Wozu dient es? (Zweck)

- Wie ist es beschaffen? Wie sieht es aus? (Gestaltung)
- Gibt es Analogien zu realen Werkzeugen?

(Den Funktionsclustern werden in enger Interaktion zwischen Moderatoren und Teilnehmern Ideen für Instrumente (potenzielle Interaktionsgeräte) zugeordnet.)

Abschlussrunde mit allgemeinem Feedback:

- Nun sind wir am Ende der Diskussionsrunde angelangt.
- Wir bedanken uns ganz herzlich für Ihre Ideen, Beiträge und Einwände.
- Zu guter Letzt interessiert es uns natürlich sehr:
    - Wie Ihnen die Diskussion gefallen hat?
    - Welche Anregungen Sie haben, um die Diskussionsrunde in Zukunft besser zu machen?

12.7.3 Protokolle der Fokusgruppen

Zusammenfassungen der handschriftlichen Protokolle, die vom Moderator während der beiden Fokusgruppensitzungen angefertigt wurden. Zur Vervollständigung wurde auf die Videomitschnitte zurück gegriffen.

12.7.3.1 Erste Fokusgruppe vom 26. Januar 2007

12.7.3.1.1 Protokoll der Fokusgruppe

An der ersten Fokusgruppe nahmen sechs Experten teil. Die Fokusgruppe wurde mit der Frage nach der Funktion des Skizzierens beim Möbeldesign eingeleitet. Die Antworten auf diese Frage können so zusammengefasst werden, dass die Teilnehmern die Ideenfindung und den Transport der mentalen Repräsentationen auf das umsetzende Medium (Papier, Computermonitor oder physisches Modell) hervorheben, wobei das Zeichnen mit Stift auf Papier als „direkte Verbindung vom Gehirn zur Hand und über den Stift aufs Papier" und „schnellstes Kommunikationsmittel" klar von den Teilnehmern bevorzugt wurde („Die Hand ist unschlagbar schnell!" oder „Maus ist nicht konkurrenzfähig zum Bleistift!"). Gleichzeitig wurde die Papierskizze auch als kreativer, individueller und intimer Prozess beschrieben, der am Computer verloren ginge („Rechnerkapazitäten sind begrenzt."). Außerdem würden „Zeichnungen … nicht weggeworfen, (…) das Gedächtnis erkennt einen Gedankengang wieder, den man beim Zeichnen gehabt hat." Die Zeichnung sei eine Art „Gedankenstütze". In diesem Kontext wurde einstimmig der Wunsch nach einer Funktion des „Zwischenständespeicherns" angegeben („eine History"). Man müsste „den Prozess des Skizzierens sichtbar machen können".

Es folgten der Stimulus und die anschließenden Fragen zum immersiven dreidimensionalen Skizzieren.

Das Skizzieren im 3D habe den Vorteil, Modelle „begehbar zu machen" und würde „…die Kommunikation auf eine andere Ebene heben". Auch könnte man den „Kontext" in Form des Raumes im 3D beim Konstruieren mit einbeziehen („mit gegebenem Kontext arbeiten."): „Kontext ist wichtig, ich gehe in dem Raum (z. B. Restaurant) und zeichne dort die Möbel hin."

Auch könnten „mehr Entscheider (…) am Modell mitarbeiten". Schwierig wäre es, in 3D-Skizzen Punkte zu finden („Referenzpunkte fehlen"), verbunden mit dem Wunsch: „Ich möchte im Raum Punkte anklicken, Linien zeichnen und ein Fußschalter rotiert das Modell."

Mehrfach wurde auch der Wunsch nach einer Bibliothek geäußert, aus der man sich „Objekte reinholen" kann („Aus einer Bibliothek Formen laden wäre doch toll!"). Bei Papierskizzen fehlt das Material, in 3D könnte dieses vorhanden sein („Bei Möbeln ist es aber so, dass Materialität eine wichtige Rolle spielt."; „Software muss einem entgegenkommen."; „Software muss Materialverhalten nachbilden können."). Außerdem erlaube das Eins-zu-eins-Bauen einen „Realitätsbezug".

Zur Verlängerung des Armes brauche man in 3D einen „Werkzeugsatz".

12.7.3.1.2 Ergebnisse: Kategoriencluster auf Metaplan

Im letzten Teil der Fokusgruppensitzung wurden von den Teilnehmern gewünschte Funktionen des immersiven dreidimensionalen Skizzierens auf Karten geschrieben und in einem gemeinsamen, diskursiven Prozess zu Gruppen zugeordnet. Dabei entstanden folgende Cluster.

Cluster 1:	Instrumente:	Finger, Unterarm, Körper, Hände, Zeichenpad (kleiner Maßstab)
Klassische CAD-Welt	Funktionen:	Aus verschiedenen Punkten im Raum Flächen Erzeugen, 3D-Flächen Dicke Zuweisen, Linien im Raum (orthogonal oder amorph) zu Flächen Verbinden (zwei bis x Linien), 3D-Flächen mit der Hand Verformen, dreidimensionale Flächen Zeichnen, abtragend Arbeiten, Zuweisen von Profilen auf den gesamten Pfad, elastische Linien/Splines, beidhändige Eingabe, von Punkt zu Punkt gerade Linien Erzeugen, Spiegeln, Verdoppeln von Teilen, Anfassen und Verschieben verschiedener Punkte im Raum, Verschieben von Objekten und Teilen, Zeichendicke und Schärfe Variieren, verlangsamte Festigkeit, Flexibilität, Verzerren, Manipulieren in jeglicher Richtung
Cluster 2:	Instrumente:	Eigener Körper, Schritt als Eingabemaß, Internetverbindung
Umgebungsbedingungen, physisch analog	Funktionen:	Zoom, Interaktionales Arbeiten (von Überall), Proportionen Prüfen, Kontext Einbeziehen, Zoom für präzises Arbeiten, Abgleichen, Messen/Bemaßen, Addierbarkeit und Maßstabsanpassung und Skalieren, Kreative Umgebung Schaffen
Cluster 3	Instrumente:	Schablonen, Schaniereisen, Aufrauen durch Reiben von Flächen
(ohne Namen)	Funktionen:	Materialeigenschaften Zuweisen, Eigenschaften (Feedback, Touch/Force, diverse Tools), Transparenzen, Bibliothek (Materialien, Halbzeuge, Produkte, Orte)
Cluster 4	Instrumente:	Schieberegler, Assistent, Lager/Bibliothek mit Regalen (schnell erreichbar)
(ohne Namen)	Funktionen:	Virtuelles Lager, Import/Export, Variante einer Skizze Bewahren (History)
Ohne Zuordnung (Cluster)	Funktionen:	Freies Gestalten von Volumen, Linie zum Zittern Bringen, Dinge fixieren Können, Abformen (von realen Gegenständen), Spracheingabe, Apfel „Z“ (Strg Z, Rückgängig-Funktion), Dokumentation des Gesprächs, Werkzeugsatz (fein bis grob)

12.7.3.2 Zweite Fokusgruppe vom 31.Januar 2007

12.7.3.2.1 Protokoll der Fokusgruppe

An der zweiten Fokusgruppe nahmen acht Teilnehmer teil. Es wurde der gleiche Leitfaden angewendet wie in der ersten Fokusgruppe.

Die Fokusgruppe wurde wieder mit der Frage nach der Funktion des Skizzierens beim Möbeldesign eingeleitet. Die Antworten auf diese Frage können so zusammengefasst werden, dass die Teilnehmern das Zeichnen mit dem Stift auf Papier als kreativer Prozess betonen („das Denken mit dem Stift“; „der Stift sucht, mit dem Stift wird überprüft, der suchende Strich“). Außerdem sei die Skizze ein „Medium, das immer verfügbar ist.“ Jedoch wurde auch geäußert, dass „immer mehr [Designer] gleich am Computer, auch in den frühen Phasen“ arbeiten. „Freiformflächen [seien] schwerer zu skizzieren“: „So gute Skizzen kann ich nicht machen, gehe relativ schnell an

den Rechner.“ Wie in der ersten Fokusgruppe wurde der Computer wieder als kreativitätshemmendes Medium beschrieben, welches die Freiheitsgrade beim Skizzieren eingrenzt: „Der Computer gibt automatisch die Form vor“; „Der Computer kann auch eine Falle sein.“ Als Antwort darauf folgte: „Das ist eine Softwarefrage.“; „Es sollte intuitive Software geben.“

Ein weiteres diskutiertes Thema dieser Fokusgruppe waren die Proportionen des Entwurfmodells, dabei sei der Computer zwar genauer, aber „Proportionen würden falsch eingeschätzt etc.“. („Ich traue dem Computer nicht.“) Die Anmutung von Raum und Proportionen könne man aber auch nicht in der Papierskizze wiedergeben. Bei großen Flächen ist die Proportion im Rechner und auf der Skizze schlecht greifbar. Proportionseinschätzung am CAD-Modell hätte jedoch auch mit Erfahrung zu tun.

Ein weiterer zentraler Diskussionspunkt war eine Äußerung, dass derzeit eine Übergangsphase herrscht, in der Papier noch gebraucht wird. Computerzeichnungen könnten auch hohen ästhetischen Wert haben („Jedes Medium bringt seine eigene Schönheit und seine eigene Kunst. Es kann tolle Computerkunst geben.“) Eine in diesem Zusammenhang geäußerte Idee bezog sich auf ein Tableau, auf dem man skizzieren könne („Ich möchte einen Rechner haben auf dem man so rumzeichnet wie auf einem Blatt Papier.“) Bereits bestehende Angebote, direkt im Rechner zu skizzieren, würden aber bisher kaum eingesetzt bzw. nicht angenommen.

Es folgten der Stimulus und die anschließenden Fragen zum immersiven dreidimensionalen Skizzieren.

Kritische Kommentare zur Videopräsentation lauteten: „Man braucht den Aufwand nicht, Papier machts.“ Oder: „Man kann im Raum keinen perfekten Kreis zeichnen!“ Später folgten Ideen, die das Konzept positiv aufnahmen: „Man kann mit zwei Fingern eine Fläche aufziehen.“, „Knete einen Stuhl!“; „Aufspannen, eventuell mit Handschuhen und Brille!“; „Virtueller Modellbau wäre toll, ein virtuelles Modell bauen, man kann drum herum gehen!“; „Raumkurve, die man im Raum manipulieren kann.“ Kritisch wurde dazu bemerkt, dass die Ideenfindung nicht in der Entwurfs- oder Konzeptphase stattfinde, sondern früher. Man brauche aber mehrere Techniken zum Skizzieren, 3D-Skizzen könnten (nur) eine sein. Das Skizzieren im dreidimensionalen Raum könne andere Fähigkeiten, andere Bewegungen freisetzen („Die Dinge entstehen anders.“) „Man muss das System wirklich haben, um zu sehen, wie anders sich Vorgänge und Arbeitsweisen gestalten.“ Ein weiterer Diskussionspunkt wurde durch die Frage eines Teilnehmers aufgebracht: „Braucht man Werkzeuge im virtuellen Raum?“ Die Gruppe zeigte Einigkeit darin, dass Werkzeuge einen Arbeitsaufforderungscharakter besäßen und den Radius der eigenen Kreativität erweitern können („Werkzeuge teilen mir etwas mit!“) Kritisch diskutiert wurde der Punkt, dass man „doch nichts Echtes in die Hand nehmen“ könne. Trotzdem äußerten alle Gruppenmitglieder den Wunsch, den ganzen eigenen Körper in den Designprozess einbringen zu können. Insgesamt besäße immersives dreidimensionales Skizzieren das Potenzial, den Produktentwicklungsprozesses zu verbessern.

12.7.3.2.2 Ergebnisse: Kategoriencluster auf Metaplan

Im letzten Teil der Fokusgruppensitzung wurden von den Teilnehmern gewünschte Funktionen des immersiven dreidimensionalen Skizzierens auf Karten geschrieben und in einem gemeinsamen, diskursiven Prozess zu Gruppen zugeordnet. Dabei entstanden folgende Cluster.

Cluster 1: Neue Modellierungstechniken	Instrumente:	Säge, Keil, Meisel, Schaber, Hand, Stange mit beweglichem Schwerpunkt, Pinzette
	Funktionen:	Falten, freies Modellieren von Volumen und präzises Modellieren und Ändern An dieses Cluster angrenzende Funktion: Haptisches Feedback und Kinematik
Cluster 2: Klassische CAD/ Modellierung, Transformieren	Instrumente:	Stift, Radiergummi
	Funktionen:	Zeichnen, Skalieren, Symmetrie Festlegen, Spiegeln, Abziehen, Hinzufügen, Schneiden von Grundkörpern, 3D-Pfade Erstellen, Flächen Spannen, Kopien Erstellen, Ausschneiden, Dehnen, Schnitte Erzeugen, Bemaßungen, Constraints (parallel, tangential), Kneten, Stauchen, Ziehen, Zerren, Drücken, geometrische Standardvolumen Erstellen, manipulierbare 3D-Vorlagen, transformierbare geometrische Grundelemente, Punkte Einfügen
Cluster 3 Abstraktionstechniken, Visualisierung	Instrumente:	Zwiebelschicht, transparenter Überdecker, Skizzen, Konstruktion, Rendern, mehrere Modelle Übereinanderlegen, Nebel verschwommen, Ungenauigkeit, Nebelfiguren
	Funktionen:	(wie Cluster 2)
Cluster 4 Bewegung/ Prozesswirkung	Instrumente:	Greifling (passt sich an Bewegung an), drucksensitiver Stift, Zeichenutensil, Spuren
	Funktionen:	Virtuelles Lager, Import/Export, Variante einer Skizze bewahren (History)
Ohne Zuordnung (Cluster)	Instrumente:	Hammer, Werkzeugkiste, Spracheingabe
	Funktionen:	Oberflächen/Material Auswählen, Zustände Speichern, Schnee Aufträufeln

12.7.3.3 Ergebnisse der Einzelinterviews

Neben der Vorbereitung der Fokusgruppen und insbesondere der Erprobung des Fragebogens wurden in den fünf Einzelinterviews folgende Ideen zu Interaktionstechniken des dreidimensionalen Skizzieren und Konstruieren mittels physischer Werkzeug generiert:

- Schablonen, auf die Flächen gezeichnet und durch den Raum gezogen (extrudieret) werden können,
- Stifte, mit denen Constraints zwischen Objekten gesetzt werden,
- ein Pedal (oder Mauskugel) zur Rotation von Baugruppen,
- physische Klötzchen (Phicons), die die Oberflächeneigenschaften der manipulierbaren Objekte haben (beispielsweise Holz).

12.8 Material der Studie 2: Immersives Skizzieren mit 3 räumlichen Freiheitsgraden

12.8.1 Anleitung und Aufgaben

Anleitung zur Voraufgabe

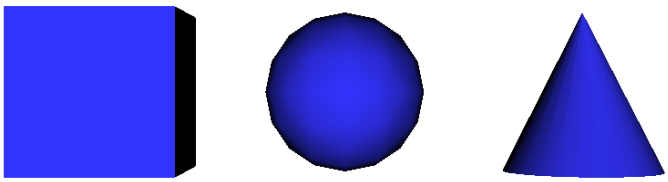
Bei der nun folgenden Aufgabe sollen Sie das 3D-Skizzieren in der CAVE üben.

Auf dem Tisch vor sich sehen sie einen Schieberegler. Durch Verschieben des Reglers können Sie sich den Entstehungsprozess Ihrer Skizze ansehen. Sie können ihn auch benutzen, um Aktionen rückgängig zu machen. Bewegen Sie ihn dazu so lange, bis alle zu löschenden Teile Ihrer Skizze verschwunden sind, und fahren Sie dann mit dem Skizzieren fort.

Eine neue Skizze können Sie anlegen, indem Sie auf der Tastatur die Tasten „0“ - „9“ drücken. Um eine bereits erstellte Skizze wieder aufzurufen, drücken Sie die entsprechende Taste.

Übungsaufgabe:

Bitte zeichnen Sie drei einfache geometrische Körper: Einen Würfel, eine Kugel und einen Kegel mit jeweils ca. 20 cm Seitenlänge bzw. Durchmesser. Die Objekte werden als Vorlage auch im virtuellen Raum zu sehen sein.



Hinweis für alle folgenden Aufgaben:

Das Zeichnen gestaltet sich angenehmer, wenn Sie etwa auf der Höhe Ihrer Hand, das heißt ca. 1,5 Meter über dem Boden zeichnen. Wir empfehlen Ihnen auch, etwas langsamer als auf Papier zu zeichnen.

Anleitung zum Skizzieren in 2D und 3D

Bei der **zweidimensionalen Variante** stellen Sie sich bitte eine imaginäre Wand in der Mitte der „CAVE“ vor, auf der Sie die Skizze zeichnen. Das System wird sie nicht daran hindern, auch dreidimensional zu zeichnen. In dieser Aufgabe sollen sie davon aber bitte nicht gebrauch machen, sondern flach auf die imaginäre Wand zeichnen.

Bei der **dreidimensionalen Variante** dürfen Sie ohne Einschränkungen in den Raum, das heißt „direkt in die Luft“, zeichnen.

Als Skizzierwerkzeug erhalten sie einen drucksensitiven Stift. Wenn sie auf dessen oberen Bügel drücken, können Sie damit eine Linie „in die Luft“ zeichnen.

Auf dem Tisch vor sich sehen sie einen Schieberegler. Durch Verschieben des Reglers können Sie sich den Entstehungsprozess Ihrer Skizze ansehen. Sie können ihn auch benutzen, um Aktionen rückgängig zu machen. Bewegen Sie ihn dazu so lange, bis alle zu löschenden Teile Ihrer Skizze verschwunden sind, und fahren Sie dann mit dem Skizzieren fort.

Eine neue Skizze können Sie anlegen, indem Sie auf der Tastatur die Tasten „0“ - „9“ drücken. Um eine bereits erstellte Skizze wieder aufzurufen, drücken Sie die entsprechende Taste.

Falls Sie es wünschen, können Sie Papierskizzen anfertigen.

Bitte entscheiden Sie selbst, wie viele Varianten und Skizzen Sie anlegen wollen und teilen Sie dem Versuchsleiter bitte mit, wenn Sie mit der Bearbeitung der Aufgabe fertig sind.

<u>Bitte beachten Sie für alle Aufgaben folgende Randbedingungen:</u>

- **Konstruktive Details müssen** Sie in die Skizze **nicht** aufnehmen, Sie können diese jedoch andeuten.
- Die Entwürfe sollten **prinzipiell realisierbar** sein.

- Die Realisierung sollte mit **bekannten Materialien** und **Fertigungstechniken** möglich sein.

Aufgabe 1:

Im neu zu gestaltenden Foyer des Fraunhofer Instituts sollen Stehtische integriert werden. Um den Aufwand für die Vorbereitung von Empfängen gering zu halten, sollen diese Stehtische von der Decke gelassen werden können. Das Design der Tische soll das elegante futuristischen Design des Foyers aufnehmen und der innovativen Forschungsausrichtung des Instituts entsprechen. Der Tisch soll trotz der Aufhängung nicht „wackeln“ und es erlauben, sich daran anzulehnen.

Skizzieren Sie bitte einen Stehtisch entsprechend dieser Beschreibung.

Aufgabe 2:

Im neu zu gestaltenden Foyer des Fraunhofer Instituts soll eine Bar integriert werden, die platzsparend ist und bei Empfängen zum Ausschank von Getränken eingesetzt werden kann. Das Design der Bar soll dem eleganten futuristischen Design des Foyers und der innovativen Forschungsausrichtung des Hauses entsprechen. Wenn keine Empfänge stattfinden, soll die Bar verschlossen sein, und möglichst dezent erscheinen.

Skizzieren Sie bitte eine Bar entsprechend dieser Beschreibung.

12.8.2 Fragebögen

Fragebogen zur Person

Alter:_____

Geschlecht: ☐ **männlich** ☐ **weiblich**

Studiengang:_____ seit _____ Jahren

Beruf: _____ seit _____ Jahren

Händigkeit: ☐ Rechtshänder ☐ Linkshänder ☐ beide Hände gleich

Sehhilfe ☐ Brille ☐ Kontaktlinsen ☐ keine

Wenn Sie im Arbeitsalltag skizzieren, wie oft skizzieren Sie dann ...

... mit Papier und Stift?

☐ täglich ☐ mehrmals in der Woche ☐ etwa 1 mal in der Woche ☐ etwa 2-3 mal im Monat ☐ etwa 1 mal im Monat ☐ seltener als 1 mal im Monat ☐ nie

... mittels des Computers?

☐ täglich ☐ mehrmals in der Woche ☐ etwa 1 mal in der Woche ☐ etwa 2-3 mal im Monat ☐ etwa 1 mal im Monat ☐ seltener als 1 mal im Monat ☐ nie

Wie häufig nutzen Sie...

... 3D-Konstruktionssoftware (3D-CAD)?

☐ täglich ☐ mehrmals in der Woche ☐ etwa 1 mal in der Woche ☐ etwa 2-3 mal im Monat ☐ etwa 1 mal im Monat ☐ seltener als 1 mal im Monat ☐ nie

... 2D- Konstruktionssoftware (2D-CAD)?

☐ täglich ☐ mehrmals in der Woche ☐ etwa 1 mal in der Woche ☐ etwa 2-3 mal im Monat ☐ etwa 1 mal im Monat ☐ seltener als 1 mal im Monat ☐ nie

Wie viel Erfahrung haben Sie mit virtuellen Umgebungen?

(„Holobench“, „CAVE“, „Datenhelme“, andere VR-Systeme)

☐ nutze ich regelmäßig ☐ nutze ich gelegentlich ☐ habe ich schon einmal ausprobiert ☐ habe ich schon einmal gesehen ☐ gar keine

Wie oft spielen Sie 3D-Computerspiele?

☐ täglich ☐ mehrmals in der Woche ☐ etwa 1 mal in der Woche ☐ etwa 2-3 mal im Monat ☐ etwa 1 mal im Monat ☐ seltener als 1 mal im Monat ☐ nie

Welche Eingabegeräte nutzen Sie?

☐ Tastatur ☐ Computermaus ☐ Zeichentablett und Stift ☐ Touchscreen ☐ Joystick

☐ weitere: _____

Wird Ihnen beim Autofahren, Computer spielen, Filmen mit „Wackelkamera“, Karussell fahren etc. schnell schlecht?

☐ nein, nie ☐ ja, selten ☐ ja, gelegentlich ☐ ja, oft ☐ ja, immer

Nachbefragung

Anleitung:

Bei den folgenden Aussagen geht es darum, wie Sie selbst über die verschiedenen Aspekte der beiden Skizziertechniken und der zwei Aufgaben denken, die Sie im Versuch kennen gelernt haben. Bitte geben Sie an, **inwieweit Sie jeder Aussage zustimmen!**

Es gibt *keine richtigen oder falschen Antworten*, wählen Sie bitte jeweils das Kästchen, das Ihre Meinung bei jeder Aussage am besten entspricht.

Bitte umblättern!

Nachbefragung zur Aufgabe __ mittels „2D-Skizzieren“

		trifft voll zu	trifft eher zu	teils/ teils	trifft eher nicht zu	trifft gar nicht zu
1	Die Aufgabe war klar formuliert.	☐	☐	☐	☐	☐
2	Die Lösung der Aufgabe war *geistig* anstrengend.	☐	☐	☐	☐	☐
3	Die Lösung der Aufgabe war *körperlich* anstrengend.	☐	☐	☐	☐	☐
4	Die Lösung der Aufgabe hat Spaß gemacht.	☐	☐	☐	☐	☐
5	Ich bin mit der gefundenen Lösung zufrieden.	☐	☐	☐	☐	☐
6	Ich konnte mit der Skizziertechnik flüssig arbeiten.	☐	☐	☐	☐	☐
7	Ich konnte mit der Skizziertechnik meine Ideen schnell umsetzen.	☐	☐	☐	☐	☐
8	Die Skizziertechnik war stets verfügbar.	☐	☐	☐	☐	☐
9	Ich habe verworfene Skizzen nicht vermisst. Es fiel mir leicht, Skizzen zu löschen.	☐	☐	☐	☐	☐
10	Der Aufwand für das Erstellen von Skizzen war gering.	☐	☐	☐	☐	☐

11	Ich habe mich im Umgang mit der Skizziertechnik sicher gefühlt.	☐	☐	☐	☐	☐
12	Die Skizziertechnik war einfach zu benutzen.	☐	☐	☐	☐	☐
13	Die Skizziertechnik war körperlich beanspruchend.	☐	☐	☐	☐	☐
14	Die Skizziertechnik war geistig beanspruchend.	☐	☐	☐	☐	☐
15	Ich konnte die Vorstellungen, die ich im Kopf hatte, gut mit der Skizziertechnik umsetzen.	☐	☐	☐	☐	☐
16	Die Skizze hat mich während des Skizzierens inspiriert. (Die Skizze hat „zu mir gesprochen“.)	☐	☐	☐	☐	☐

		trifft voll zu	trifft eher zu	teils/ teils	trifft eher nicht zu	trifft gar nicht zu
17	Die Skizziertechnik hat mir geholfen, die Lösung zu entwickeln.	☐	☐	☐	☐	☐
18	Beim Betrachten der Skizze sind mir neue Ideen gekommen.	☐	☐	☐	☐	☐

Hat Ihnen die Skizziertechnik geholfen? Bitte nennen Sie die wichtigsten Gründe. (optional)

_____
_____
_____
_____
_____
_____

Gab es Probleme bei der Lösung der Aufgabe? Wenn ja, welche?

_____
_____
_____
_____
_____
_____

	ja	nein
Haben Sie zur Lösung der Aufgabe zusätzlich Papierskizzen angefertigt?	☐	☐

Warum haben Sie Papierskizzen eingesetzt bzw. warum nicht?

_____
_____
_____
_____
_____
_____

Nachbefragung zur Aufgabe __ mittels „3D-Skizzieren“

(Identisch zur „Nachbefragung zur Aufgabe __ mittels ‚2D-Skizzieren’“, s. o.)

Beurteilung der 2D- und 3D-Skizziertechniken

Nachfolgend finden Sie Wortpaare, mit deren Hilfe Sie die Beurteilung der **2D- und 3D-Skizziertechniken** vornehmen können, die Sie während des Versuchs kennen gelernt haben. Diese Wortpaare stellen jeweils extreme Gegensätze dar, zwischen denen eine Abstufung möglich ist.

Denken Sie nicht lange über die Wortpaare nach, sondern geben Sie bitte die Einschätzung ab, die Ihnen **spontan** in den Sinn kommt. Es gibt *keine richtigen oder falschen Antworten*. Kreuzen Sie je Zeile bitte immer eine Antwort an.

Beachten Sie, dass Sie den Fragebogen **zwei Mal** ausfüllen sollen – für jede Interaktionstechnik einmal. Berücksichtigen Sie also beim Ausfüllen eines Fragebogens jeweils **nur die Eindrücke, die Sie von der entsprechenden Skizziertechnik (2D, 3D) haben**.

Bitte umblättern!

Beurteilung „2D-Skizzieren“

Bitte geben Sie mit Hilfe der folgenden Wortpaare Ihren Eindruck zur Skizziertechnik *„2D-Skizzieren“* wieder.

menschlich	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	technisch
isolierend	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	verbindend
angenehm	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	unangenehm
originell	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	konventionell
einfach	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	kompliziert
fachmännisch	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	laienhaft
hässlich	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	schön
praktisch	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	unpraktisch
sympathisch	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	unsympathisch
umständlich	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	direkt
stilvoll	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	stillos
voraussagbar	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	unberechenbar
minderwertig	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	wertvoll
ausgrenzend	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	einbeziehend
bringt mich den Leuten näher	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	trennt mich von Leuten
nicht vorzeigbar	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	vorzeigbar
zurückweisend	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	einladend
phantasielos	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	kreativ
gut	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	schlecht

verwirrend	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	übersichtlich
abstoßend	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	anziehend
mutig	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	vorsichtig
innovativ	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	konservativ
lahm	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	fesselnd
harmlos	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	herausfordernd
motivierend	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	entmutigend
neuartig	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	herkömmlich
widerspenstig	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	handhabbar

© AttrakDiff 2.0 (deutsch), Marc Hassenzahl, www.attrakdiff.de
Hassenzahl, M., Burmester, M., & Koller, F. (2003). AttrakDiff: Ein Fragebogen zur Messung wahrgenommener hedonischer und pragmatischer Qualität. In J. Ziegler & G. Szwillus (Hrsg.), Mensch & Computer 2003. Interaktion in Bewegung (S. 187-196). Stuttgart, Leipzig: B.G. Teubner.

Beurteilung „3D-Skizzieren“

Bitte geben Sie mit Hilfe der folgenden Wortpaare Ihren Eindruck zur Skizziertechnik *„3D-Skizzieren“* wieder.

(Identisch zu „Beurteilung ‚3D-Skizzieren’“, s. o.)

12.8.3 Auswertungsbögen der Expertenbewertung

Bewertung des entworfenen Produkts

Allgemeine Anforderungen

Funktions- / Wirkprinzip

unbefriedigend **sehr gut, ideal**

-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6

← **unter Durchschnitt** | **über Durchschnitt** →

Kreativer Wert des entworfenen Produkts

Neu, Nützlich, Brauchbar

Niedrig **hoch**

-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6

← **unter Durchschnitt** | **über Durchschnitt** →

Bewertung der Skizze

Ästhetischer Wert der Skizze

hässlich **schön**

-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6

← **unter Durchschnitt** | **über Durchschnitt** →

Skizzenhaftigkeit

Charakteristische Skizziersprache, Skizzierstil, wenig Details

gering **hoch**

-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6

← **unter Durchschnitt** | **über Durchschnitt** →

Mehrdeutigkeit (Ambiguität)

Lösungsideen, Assoziationen, Verbindungen, Varianten beim Betrachten der Skizze

wenige **viele**

-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6

← **unter Durchschnitt** | **über Durchschnitt** →

12.8.4 Kategorienschema der qualitativen Auswertung der Benutzeräußerungen

Tabelle 26: Kategorienschema der qualitativen Analyse der Benutzeräußerungen.

Kategorie	**Unterkategorie 1** (In den Klammern ist angegeben, ob die Kategorie positiv oder negativ bewertet wurde)	**Unterkategorie 2** (In den Klammern ist angegeben, ob die Kategorie positiv oder negativ bewertet wurde)	**Beispiel**
Sensumotorik des Skizzierens und Zeichnens (Wahrnehmung, Auge-Hand Koordination)	Punkte im Raum Finden (-)		Punkte Widertreffen/ Anschlusspunkte/ Ansatzpunkte/ Linien im Raum Wiedertreffen/ Positionierung der Linie/ Höhen und Winkel Ansetzen/ Anfangs- und Endpunkt der Linien
	Punkte im Raum Finden (+)		
	Verzerrungen (-)		Bild verzerrt bzw., bewegt sich beim Laufen
	hohe Reaktionszeit/ Verzögerung beim Zeichnen (-)		Latenz beim schnellen Kritzeln/ im Detail-Bereich/ beim Linienzeichen/ Delay/ Stiftspitze entspricht nicht der Handbewegung/ nicht mit der Hand synchron
	Abstand/ Übereinstimmung Stift-Strich (-)		virtueller Pfeil nicht als Verlängerung der Spitze, Abweichung zwischen Werkzeug und virtueller Spitze muss durch das Zeichnen herausgefunden werden/ Skizziertechnik – Abstand zum „Blatt“ zu groß/ keine Übereinstimmung des Stiftes mit dem Stiftspitze/ Stiftspitze hat je nach Betrachtungswinkel einen anderen Abstand zum Stift/ keine Übereinstimung mit dem Anfang der Linie/ keine Übereinstimmung mit der Stiftspitze/ Linie erscheint nicht dort, wo sie gezeichnet wird
	Verdeckung der Skizze durch Stift oder Körper (Occlusion) (-)		

	Genauigkeit und Präzision, Details Zeichnen (-)		unberechenbar/ wackelig/ "ruckelig"/ kompliziert/ schwer/ zu dick/ zu grob/ (Miene) nicht fein genug/ ungenau/ unpräzis/ unkontrollierbar/ Unkontrollierbarkeitsgefühl/ geringe Kontrolle/ Unsicherheitsgefühl/ längere Linien Zeichnen/ parallele Linie
	Genauigkeit und Präzision (+)		Genauigkeit des Stiftes und der Linie
	auf eine Ebene zu zeichnen (-)		
	in die Tiefe zu zeichnen (-)		
	Probleme beim Schreiben (-)		
	Linien zu zeichnen (-)	allgemeine Probleme beim Zeichnen	
		gerade Linien zu zeichnen	wellige Linien
	Flächen zu zeichnen (-)	Flächen Schraffieren	
		Flächen Erzeugen, gekrümmte Flächen	
	Körper Zeichnen (Kugeln etc.) (-)		Körper Zeichnen und das Gezeichnete als Körper Wahrnehmen
Ergonomie	Gebrauch des phys. Stifts/ hybr. Stifts/ Handschuhs	Handhabung/ Lage in der Hand (-)	Knopf schwer zu treffen/ Kontakte zu weit unten/ krampfige Haltung/ unangenehme Handdrehungen/ Probleme des Linienzeichnens (Drücken)/ versehentliches Zeichnen
		Handhabung (+)	beste Ergonomie beim … Stift
		Stiftführung (-)	freie Linienführung
		Einfachheit (+)	
		störende Kabel (-)	Einschränkung der Bewegung/ Beanspruchung in der falschen Richtung
	fehlende haptische Rückmeldung (-)	allgemein	
		Widerstand (fehlend)	Stift Ansetzen/ Fläche Erfühlen
	CAVE-Einschränkungen (-)	Caveraum zu klein	räumlich eingeschränkt
		Fehlende sechste Seite der	

		CAVE	
		Mangelnde Kontrolle des unteren/ hinteren Bereichs	
	allgemeine Probleme (-)		unbeholfen
Methodisch Unterstützungsfunktionen (Unterstützung des methodischen Handelns)	Ideenentwicklung (+)		
	Ideenentwicklung (-)		
	Lösungsfindung (+)	allgemein	
		Experimentieren, Ausprobieren	
		Externalisieren	Ideen festhalten, Gedächtnisentlastung, Externalisieren
		Ideen schnell Scribbeln/ Kritzeln, Scribbel (Kritzeln)	
		Interaktive Auseinandersetzung mit der Skizze	
		Schnelligkeit der Lösungsfindung	
	Lösungsfindung (-)	allgemein	
	Kommunikationsmittel (+)		ggü. Kunden, ggü. Kollegen
	Dokumentationsmittel (Langzeitspeicher) (+)		Speichermöglichkeit/ Verfügbarkeit – Herunterladen der Skizze
	Umsetzen der Ideen (+)		
	Umsetzen der Ideen (-)		Umsetzung der Idee schwierig/ hoher Zeitaufwand/ Skizzen dauern lange
	Assoziation, Kontext (+)		
	Analyse (+)		Problemzonen Festmachen Überprüfung des Funktions- und Wirkprinzips/ neue Einsichten/ Probleme entdecken/ räumliche „Analyse“
Funktionalitäten	Fehlenden Funktionen (Defizite) (-) (wurden als Mangel empfunden)	Radieren	
		Darstellungsprobleme	kein Schatten
		kein Verformen	
		verschiedene Farben	
		Snap-Funktion	

		Schraffieren	
		Verzicht auf visuelles Feedback	
	Vorschläge/ Empfehlungen (+) (wurde als Potenzial gesehen, als Wunsch geäußert)	Beim skizzieren Anfangs- und Endpunkte setzen	
		Copy&Paste	
		Spiegelfunktion	
		Primitive einblenden (Kugeln, Würfel, etc.)	
		3D-Grid	
		Zoom	
		Beidhändig Zeichnen	Markerprinzip mit 2 Enden
		Digitalität	Integration in CAD
Vergleich herkömmlicher Prozess	Papierskizzen vs. Skizziertechnik (ST schlechter, -)		ähnlich wie erste Scribbles auf Papier/ langsamer/ ungenauer
	Papierskizzen vs. Skizziertechnik (ST besser, +)		Papier: keine Unterstützung 3D-räumlicher Skizzen/ ST: nicht abstrahieren zu brauchen (2D)/ ST: räumlicher (größere Grenzen)/ reizvoller
	Kein Unterschied zw. Papierskizze und Skizziertechnik (=)		Papier: kein Mehrwert, kein Zusatznutzen
	Papierskizzen wurden nicht angefertigt, waren nicht nötig (=)		die Aufgabe verlangt es nicht, Papierskizzen anzuwenden/ Möglichkeit nicht wahrgenommen/ vergessen
	Idee schon im Kopf/ keine Unterstützungsfunktion durch ST erwartet (=)		keine Unterstützung durch Skizziertechnik/ Idee schon im Kopf vorhanden
	Modellieren vs. Skizziertechnik (ST schlechter, -)		
	Modellieren vs. Skizziertechnik (ST besser, +)		
	CAD vs. Skizziertechnik (ST schlechter, -)		
	CAD vs. Skizziertechnik (ST besser, +)		
	Vergleich mit An-der-Tafel-Zeichnen vs. Skizziertechnik		weniger komfortabel

Skizzierprozess			
Skizzierprozess kognitiv (allgemein)	Aufmerksamkeit (-)	Aufmerksamkeit gerichtet auf Technik oder Papier	Ablenkung von der Idee durch die neue Technik
		Aufmerksamkeit allgemein	
	Aufmerksamkeit (+)	Aufmerksamkeit gerichtet auf Idee	Konzentration fördernd (besser als bei anderen)
	Erlernbarkeit , Umgewöhnung (-)		
	Erlernbarkeit schnell (+)		
	Übungseffekte (+)		
Skizzierprozess physisch	Beanspruchung: körperlich (-)		Anstrengung, Kopfschmerzen
	Einbeziehung des Körpers (+)		Selbstwahrnehmung der Körperbewegungen beim Skizzieren
	Gefühl, direkt am Modell zu Arbeiten (+)		
Skizzierprozess/ Reflektionsprozess	Maßstäblichkeit (eins-zu-eins) (+)		Darstellung eins-zu-eins möglich/ realer Maßstab/ größere Dimension/ anschauliche Größe der Skizze/ Skizzieren in der realen Welt
	Umsetzung dauert lang (-)		hohe Zeitdauer
	Räumlichkeit	räumliche Operationen, raumgreifendes Arbeiten (+)	
		Raumwirkung - der CAVE (+)	(auch schon in der leeren CAVE)
		Räumliches Denken (Skizze) (+)	ein räumliches Verständnis des Produkts Entwickeln/ Raumverständnis/ 3D-Skizzieren besser („richtiger“, „aussagekräftiger“) als 2D, da Produkte auch räumlich sind/ Herausfühlen der skulpturalen Auswirkung
		(Raum-)Orientierung (-)/ (Raum-)Verständnis (-)	Problematisch/ Fehlen der Anhaltspunkte/ Fehlendes Feedback in der „Tiefe“/ mangelhaft/ keine Objekterkennung, da Objekte kein Volumen haben
		(Raum-)Orientierung/ Raumeindruck (+)	3D-Beurteilung/ Beurteilung der Volumina

		Orientierung der Linien zueinander (-)	Abstand der vorgestellten Zeichenlinien zur tatsächlichen Linie im Raum/ Objekte zueinander in Bezug setzen/ überschneiden
		Größenwahrnehmung der Skizze (-)	
		Mehr Freiheitsgrade (+)	Herausforderung nur in virtueller Form zu lösen mehr Ausdrucksmöglichkeiten durch drei Freiheitsgrade
		Innenansicht von Skizzen (+)	im „Inneren von Objekten" Zeichnen/ Hineingehen/ im Inneren Sein
		Perspektiven (+)	mehrere Blickwinkel auf die Skizze/ herum Gehen um die Skizze/ unterschiedliche Perspektive/ ermöglicht alle Blickwinkel zu betrachten
		schnelles räumliches Feedback (+)	direktes Feedback für Positionierung/ Raumeindruck
	Inspiration (+)	eigene Ästhetik	
		Phantasie	im künstlichen Sinne/ Phantasie anregend
		Spaß	
		Neugier, Herausforderung	„Nur" aus Neugier benutzt/ kein 2D genutzt/ Herausforderung
		Spontaneität	
		Freiheit/ Flüssigkeit	Freiheitsgefühl/ keine Restriktionen
		Vorstellungskraft	der Proportionen/ des Möbels in den Raum, in dem es es später Einsatz findet
Sonstiges	Systemabsturz (-)		
	Probleme mit der Aufgabe (-)		die Lösung erfordert mehr Zeit/Aufgabe ist komplex
	Unangemessene Versuchsbedingung (-)	2D im 3D Zeichnen/ Vorstellen	
	Digitalität (+)		Medienbrüche Vermeiden

12.8.5 Messdaten

12.8.6 Ergebnisse der qualitativen Analyse der Benutzeräußerungen

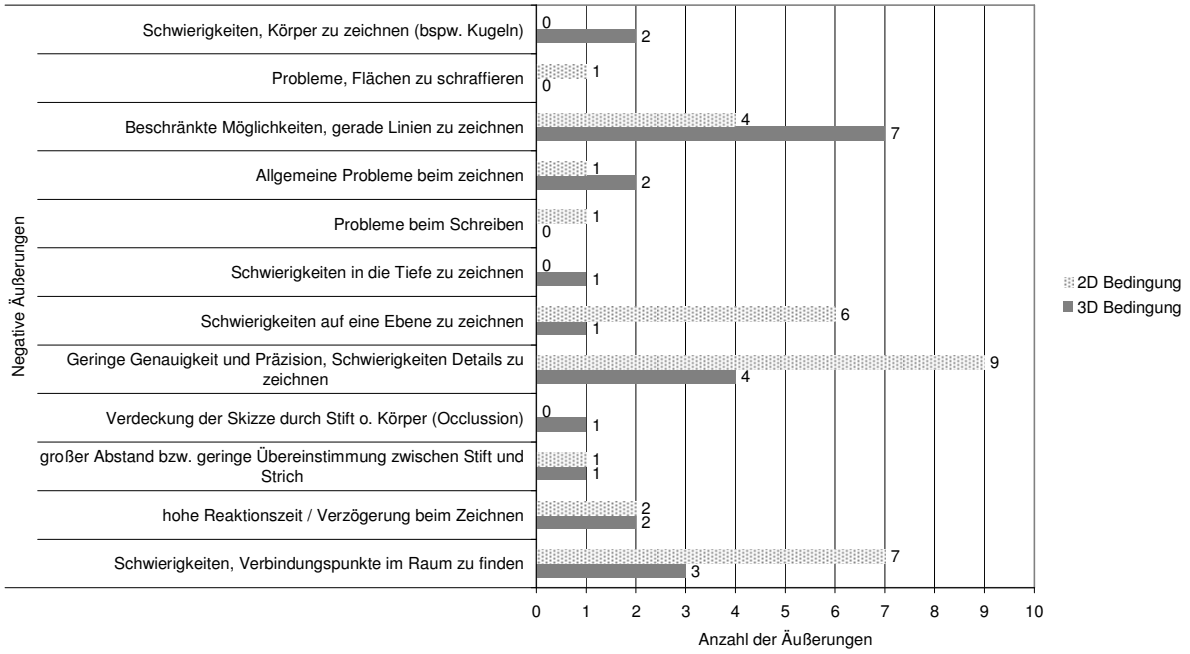


Abbildung 112: Benutzeräußerungen zur sensumotorischen Kontrolle.

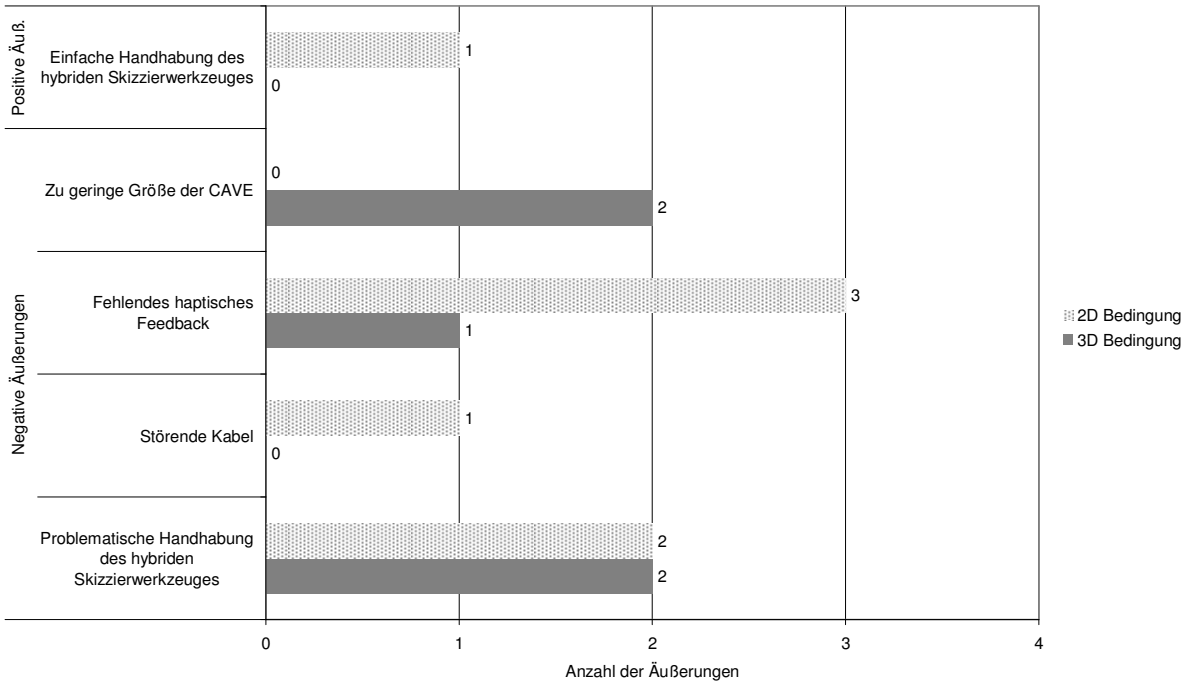


Abbildung 113: Benutzeräußerungen zur Ergonomie.

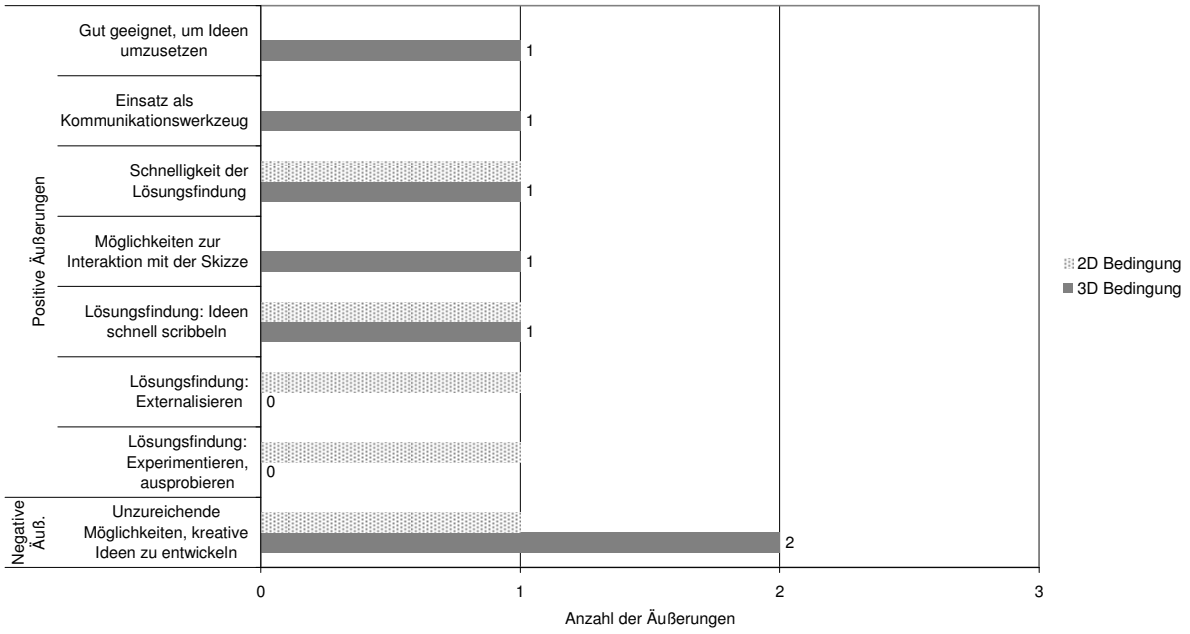


Abbildung 114: Benutzeräußerungen zur methodischen Unterstützung.

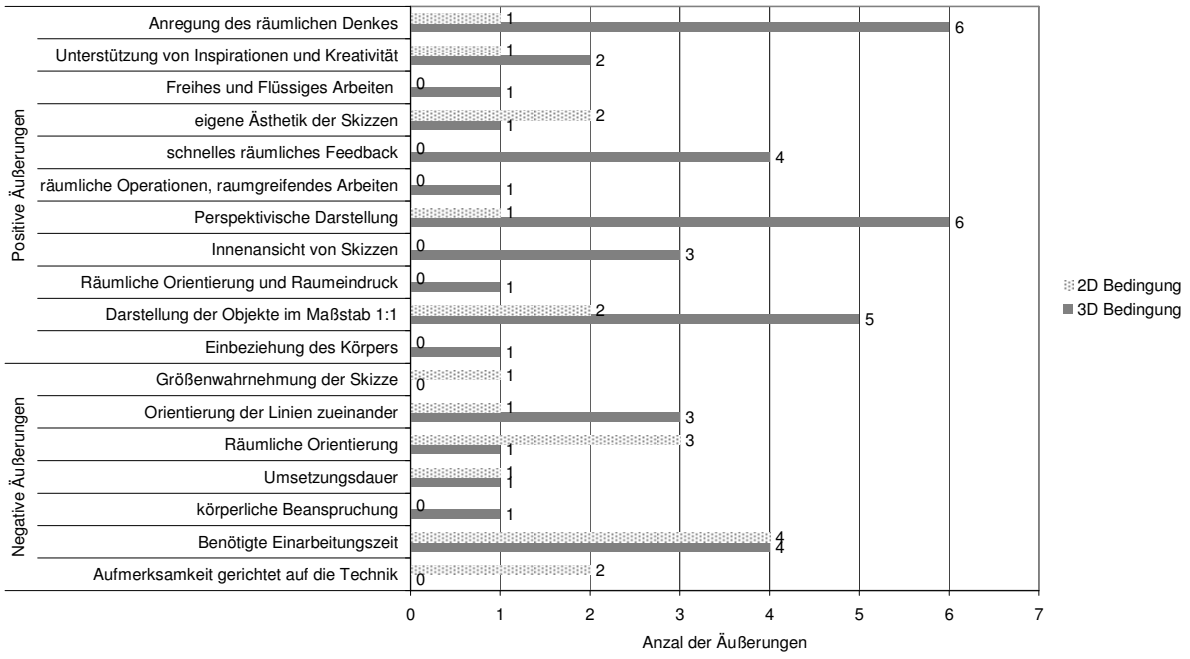


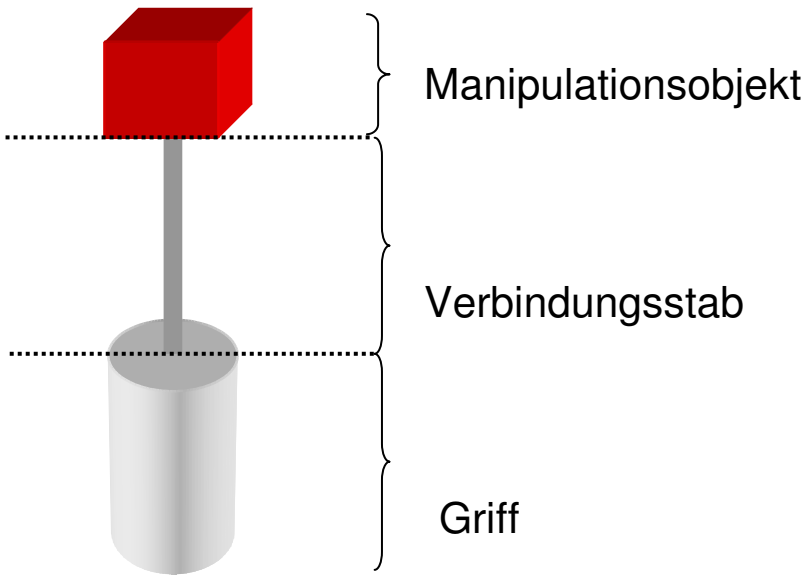
Abbildung 115: Benutzeräußerungen zum Skizzierprozess.

12.9 Material der Studie 3: Hybride Objekte in virtuellen Umgebungen

12.9.1 Anleitung und Aufgaben

Hinweise zu den Interaktionstechniken

Während des Versuchs sollen Sie Aufgaben mit einem Objekt durchführen. Hier eine schematische Darstellung des Objekts:



Fassen Sie alle Objekte **stets am Griff an** und benutzen Sie dabei **nur Ihre rechte Hand!** Entscheidend für die Durchführung der Aufgaben ist die Bewegung und Positionierung des **roten Manipulationsobjekts.** Der Griff dient nur der besseren Handhabung des Manipulationsobjekts.

Im Versuch sollen Sie **zwei Aufgaben** mit jeweils **drei Interaktionstechniken** ausführen. Je nachdem, welche Interaktionstechnik Sie gerade benutzen sollen, werden die Einzelteile des Objekts **virtuell** oder **real** sein:

(1) Rein physische Objekte

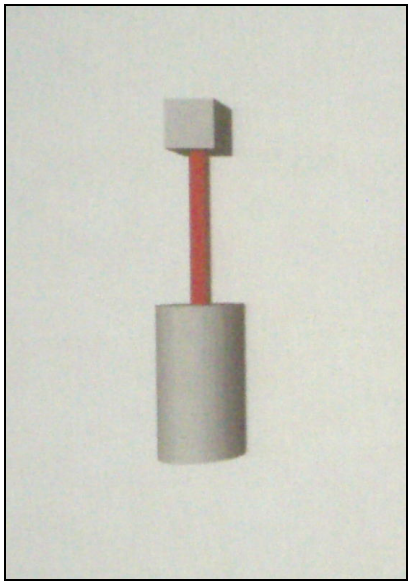
Hier sind alle drei Einzelteile des Objekts real, d.h. echte, physische Körper.

(2) Hybride Objekte

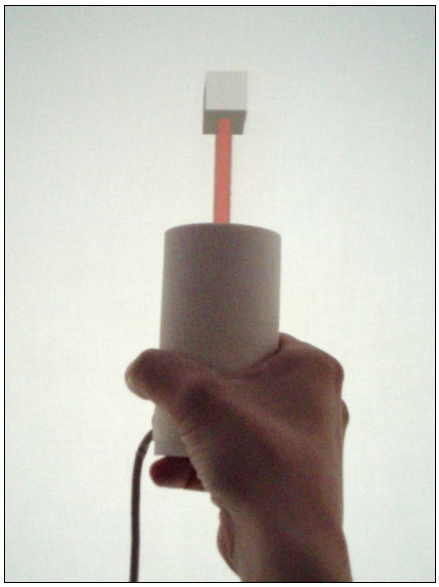
Hier ist der Griff des Objekts real, der Verbindungsstab und das Manipulationsobjekt sind jedoch virtuell.

(3) Virtuelle Objekte

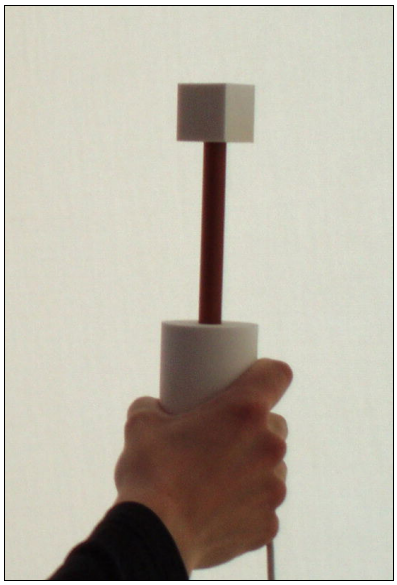
Alle Teile des Objekts sind virtuell. Virtuelle Objekte werden Sie mit dem „Datenhandschuh“ bewegen können, den Sie vom Versuchsleiter erhalten.



virtuell



hybrid



physisch

Anleitung zur Würfel-Rotationsaufgabe

Bei der nun folgenden Aufgabe sollen Sie Würfel unterschiedlicher Größe in verschiedene Ausrichtungen rotieren. Dazu werden ein blauer und ein roter Würfel eingeblendet.

Ihre Aufgabe wird es sein, den roten Würfel so zu rotieren, dass er von seiner räumlichen Orientierung einem eingeblendeten blauen Vergleichswürfel entspricht. Die Orientierung des blauen Würfels variiert von Durchgang zu Durchgang und wird durch den Zufall bestimmt. Beachten Sie immer nur die momentane Orientierung!

Wenn Sie das Gefühl haben, dass sich der rote Würfel in der richtigen Orientierung befindet, halten Sie den Würfel **für etwa eine Sekunde** ruhig in dieser Position, damit der Computer registrieren kann, dass Sie sich auf diese räumliche Orientierung des Würfels festlegen wollen.

An welcher Stelle Sie den roten Würfel rotieren, bleibt Ihnen überlassen. Wichtig ist nur die räumliche Orientierung. **Beachten Sie aber, dass sich die beiden Würfel nicht überschneiden sollen!** Auch sollten Sie sich nicht im Raum bewegen, bleiben Sie also stets auf der markierten Stelle stehen!

Halten Sie den Griff vor Beginn eines Durchgangs so in Ihrer Hand, dass der rote Würfel sich in etwa an Stelle der eingeblendeten gelben Kugel befindet. Zu Beginn eines Durchgangs wird dann der blaue Vergleichswürfel eingeblendet.

Bewegen Sie den roten Würfel aber erst, wenn Sie mit dem Durchgang beginnen möchten! Sie selbst bestimmen, wann die Zeitmessung beginnt: Sobald Sie das Objekt bewegen, wird die Zeit gemessen.

Versuchen Sie bei jedem Durchgang den Würfel so **schnell und so genau wie möglich** zu rotieren.

Sobald der Computer die von Ihnen geschätzte Orientierung registriert hat, verschwindet der blaue Würfel. Halten Sie nun das Objekt wieder in etwa an die Stelle,

an der sich die gelbe Kugel befindet und **bewegen Sie sich nicht, bevor der nächste Durchgang beginnt,** also der nächste blaue Vergleichswürfel eingeblendet wird.

Insgesamt werden pro Interaktionstechnik zwölf Würfel eingeblendet werden, sechs kleine und sechs große.

Sie können nun zunächst den Ablauf dieser Aufgabe üben. Anschließend wird Ihnen vom Versuchsleiter mitgeteilt, wann die Aufgabe beginnt.

Anleitung zur Kugel-Positionierungsaufgabe

Bei der nun folgenden Aufgabe sollen Sie Kugeln unterschiedlicher Größe an verschiedene Stellen im Raum positionieren. Dazu wird eine blaue Kugel eingeblendet, die in einem bestimmten Abstand über einem blauen Feld schwebt.

Ihre Aufgabe ist es, die rote Kugel so zu bewegen, dass sie im genau gleichen Abstand über dem roten Zielfeld „schwebt", in dem auch die blaue Kugel über dem blauen Feld schwebt. Dieser Abstand variiert von Durchgang zu Durchgang und wird durch den Zufall bestimmt. Beachten Sie immer nur den momentanen Abstand!

Wenn Sie das Gefühl haben, dass sich die rote Kugel im richtigen Abstand befindet, halten Sie die Kugel dort **für etwa eine Sekunde** ruhig, damit der Computer registrieren kann, dass Sie sich auf diese Position festlegen wollen.

Sie sollten sich während der Aufgabe nicht im Raum bewegen, bleiben Sie also stets auf der markierten Stelle stehen!

Halten Sie den Griff vor Beginn eines Durchgangs so in Ihrer Hand, dass die rote Kugel sich in etwa an Stelle der eingeblendeten gelben Kugel befindet. Zu Beginn eines Durchgangs werden dann die blaue Kugel, das blaue Feld sowie das rote Zielfeld eingeblendet.

Bewegen Sie die rote Kugel aber erst, wenn Sie mit dem Durchgang beginnen möchten! Sie selbst bestimmen, wann die Zeitmessung beginnt: Sobald Sie das Objekt bewegen, wird die Zeit gemessen.

Versuchen Sie bei jedem Durchgang die Kugel so **schnell und so genau wie möglich** zu positionieren.

Sobald der Computer die von Ihnen geschätzte Position registriert hat, verschwinden die blaue Kugel und das rote und blaue Feld. Halten Sie nun das Objekt wieder in etwa an die Stelle, an der sich die gelbe Kugel befindet und **bewegen Sie sich nicht, bevor der nächste Durchgang beginnt**

Insgesamt werden zwölf Kugeln eingeblendet, sechs kleine und sechs große.

Sie können nun zunächst den Ablauf dieser Aufgabe üben. Anschließend wird Ihnen vom Versuchsleiter mitgeteilt, wann die Aufgabe beginnt.

12.9.2 Fragebögen

Den Teilnehmern wurden folgende Fragebögen vorgelegt:

- Fragebogen zur Person
- Nachbefragung (eigene Fragebögen)
    - Nachbefragung zur Würfel-Rotationsaufgabe
    - (Nachbefragung zur Kugel-Positionierungsaufgabe)
    - Nachbefragung zur Interaktionstechnik „Rein physische Objekte“
    - (Nachbefragung zur Interaktionstechnik „Hybride Objekte“)
    - (Nachbefragung zur Interaktionstechnik „Virtuelle Objekte“)
- Beurteilung der Interaktionstechniken (AttrakDiff)
    - Beurteilung „Rein physische Objekte“
    - (Beurteilung „Hybride Objekte“)
    - (Beurteilung „Virtuelle Objekte“)
- 3D-Würfeltest

Die in Klammern aufgeführten Fragebögen werden hier nicht wiedergegeben, sie sind inhaltlich bis auf Anpassungen einiger Bezeichnungen zu den entsprechenden Fragebögen der Rotationsaufgabe beziehungsweise zu den Fragebögen zu physischen Objekten identisch.

Fragebogen zur Person

Alter:_____

Geschlecht:_____

Beruf/ Studiengang:_____

Händigkeit: ☐ Rechtshänder ☐ Linkshänder

Sehhilfe ☐ Brille ☐ Kontaktlinsen ☐ keine

Wie fühlen Sie sich im Moment?

☐ sehr unwohl ☐ etwas unwohl ☐ durchschnittlich ☐ gut ☐ sehr gut

Wie viele Stunden haben Sie letzte Nacht geschlafen? _____

Wie viele Stunden schlafen Sie gewöhnlich? _____

Wie viel Kaffee/ Tee/ andere koffeinhaltige Getränke haben Sie heute zu sich genommen? _____ Tassen (à 200ml)

Wie viele dieser Getränke trinken Sie gewöhnlich am Tag? _____ Tassen (à 200ml)

Haben Sie innerhalb der letzten acht Stunden Alkohol oder andere Rauschmittel zu sich genommen?

☐ ja

☐ nein

Wie viel Erfahrung haben Sie mit 3D-Spielen?

☐ keine ☐ wenig ☐ durchschnittlich ☐ viel ☐ sehr viel

Wie viel Erfahrung haben Sie mit Joysticks?

☐ keine ☐ wenig ☐ durchschnittlich ☐ viel ☐ sehr viel

Wie viel Erfahrung haben Sie mit virtuellen Umgebungen?

(„Holobench“, „CAVE“ andere VR-Systeme)

☐ keine ☐ wenig ☐ durchschnittlich ☐ viel ☐ sehr viel

Wie viel Erfahrung haben Sie mit 3D-Konstruktionsprogrammen (CAD)?

☐ keine ☐ wenig ☐ durchschnittlich ☐ viel ☐ sehr viel

Wird Ihnen beim Autofahren, Computer spielen, Filmen mit „Wackelkamera“, Karussell fahren etc. schnell schlecht?

☐ nie ☐ selten ☐ gelegentlich ☐ oft ☐ immer

Nachbefragung

Anleitung:

Bei den folgenden Aussagen geht es darum, wie Sie selbst über die verschiedenen Aspekte der drei Interaktionstechniken und der zwei Aufgaben denken, die Sie im Versuch kennen gelernt haben. Bitte geben Sie an, **inwieweit Sie jeder Aussage zustimmen!**

Es gibt *keine richtigen oder falschen Antworten*, also wählen Sie jeweils das Kästchen, das Ihre Meinung bei jeder Aussage am besten entspricht. Lassen Sie sich ruhig Zeit und bedenken Sie jede Aussage genau.

Beispiel:

Wenn Sie der Meinung sind, dass die Aussage „Ich sehe gern fern“ eher wenig stimmt, kreuzen Sie bitte das entsprechende Kästchen an.

	stimmt gar nicht	stimmt wenig	stimmt teils/ teils	stimmt ziemlich	stimmt vollständig
Ich sehe gerne fern.	☐	☒	☐	☐	☐

Bitte umblättern!

Nachbefragung zur Würfel-Rotationsaufgabe

		stimmt gar nicht	stimmt wenig	stimmt teils/ teils	stimmt ziemlich	stimmt vollständig
1	Die Würfel-Rotationsaufgabe war klar formuliert.	☐	☐	☐	☐	☐
2	Die Würfel-Rotationsaufgabe war *geistig* anstrengend.	☐	☐	☐	☐	☐
3	Die Würfel-Rotationsaufgabe war *körperlich* anstrengend.	☐	☐	☐	☐	☐
4	Die Würfel-Rotationsaufgabe hat Spaß gemacht.	☐	☐	☐	☐	☐

Beurteilung der eigenen Leistung

Bitte geben Sie an, wie **Sie selbst Ihre Leistung** bei der **Würfel-Rotationsaufgabe** einschätzen, die Sie mit den verschiedenen Interaktionstechniken durchgeführt haben!

(- - - sehr schlecht, +++ sehr gut)

	- - -	- -	-	- / +	+	++	+++
Selbst eingeschätzte Leistung bei der Würfel-Rotationssaufgabe mit der Interaktionstechnik **„rein physische Objekte“**	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Selbst eingeschätzte Leistung bei der Würfel-Rotationsaufgabe mit der Interaktionstechnik **„hybride Objekte“**	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Selbst eingeschätzte Leistung bei der Würfel-Rotationsaufgabe mit der Interaktionstechnik **„virtuelle Objekte“**	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Nachbefragung zur Interaktionstechnik
„Rein physische Objekte“

Alle Aussagen auf dieser Seite beziehen sich *nur* auf die Interaktionstechnik „rein physische Objekte“.

Zur Erinnerung: Bei rein physischen Objekten ist sowohl der Griff als auch die angebrachte rote Kugel bzw. der angebrachte rote Würfel *real*.

Berücksichtigen Sie bei allen Aussagen Ihren Eindruck zu **beiden Aufgaben** *(Kugel-Positionierungsaufgabe und Würfel-Rotationsaufgabe)*, die Sie mit der Interaktionstechnik „rein physische Objekte“ durchgeführt haben, es sei denn, es wird speziell nach einer der beiden Aufgaben gefragt.

		stimmt gar nicht	stimmt wenig	stimmt teils/ teils	stimmt ziemlich	stimmt vollständig
1	Der Griff und das angebrachte Objekt erschienen mir insgesamt als Einheit.	☐	☐	☐	☐	☐
2	Der Griff und das angebrachte Objekt erschienen mir als *visuelle* Einheit.	☐	☐	☐	☐	☐
3	Der Griff und das angebrachte Objekt erschienen mir als *physische* Einheit.	☐	☐	☐	☐	☐
4	Die Interaktionstechnik war gut geeignet für die *Kugel-Positionierungsaufgabe.*	☐	☐	☐	☐	☐

5	Die Interaktionstechnik war gut geeignet für die *Würfel-Rotations*aufgabe.	☐	☐	☐	☐	☐
6	Ich habe mich im Umgang mit der Interaktionstechnik sicher gefühlt.	☐	☐	☐	☐	☐
7	Die Interaktionstechnik war körperlich beanspruchend.	☐	☐	☐	☐	☐
8	Die Interaktionstechnik war geistig beanspruchend.	☐	☐	☐	☐	☐
9	Ich konnte mit dieser Interaktionstechnik die virtuelle Realität gut kontrollieren.	☐	☐	☐	☐	☐
10	Mir ist während des Umgang mit der Interaktionstechnik schlecht geworden.	☐	☐	☐	☐	☐

Beurteilung der Interaktionstechniken

Nachfolgend finden Sie Wortpaare, mit deren Hilfe Sie die Beurteilung der **drei Interaktionstechniken** vornehmen können, die Sie während des Versuchs kennen gelernt haben. Diese Wortpaare stellen jeweils extreme Gegensätze dar, zwischen denen eine Abstufung möglich ist.

Ein Beispiel:

unsympathisch	○ ○ ○ ○ ⊗ ○ ○	sympathisch

Diese Bewertung bedeutet, dass die Interaktionstechnik eher sympathisch, aber noch verbesserungsbedürftig ist.

Denken Sie nicht lange über die Wortpaare nach, sondern geben Sie bitte die Einschätzung ab, die Ihnen **spontan** in den Sinn kommt. Vielleicht passen einige Wortpaare nicht so gut auf die Interaktionstechnik, kreuzen Sie aber trotzdem bitte immer eine Antwort an. Denken Sie daran, dass es keine "richtigen" oder "falschen" Antworten gibt - nur Ihre persönliche Meinung zählt!

Beachten Sie, dass Sie den Fragebogen **drei Mal** ausfüllen sollen – für jede Interaktionstechnik einmal. Berücksichtigen Sie also beim Ausfüllen eines Fragebogens jeweils **nur die Eindrücke, die Sie von der entsprechenden Interaktionstechnik *(rein physisch, hybrid, virtuell)* haben**.

Bitte umblättern!

Beurteilung „Rein physische Objekte“

Bitte geben Sie mit Hilfe der folgenden Wortpaare Ihren Eindruck zur Interaktionstechnik *„rein physische Objekte“* wieder. **Zur Erinnerung: Bei rein physischen Objekten ist sowohl der Griff als auch die angebrachte rote Kugel bzw. Würfel real.**

Bitte beachten Sie Ihre Eindrücke bei beiden Aufgaben *(Kugel-Positionierungsaufgabe und Würfel-Rotationsaufgabe)*, die Sie mit der Interaktionstechnik **„rein physische Objekte“** durchgeführt haben!

Bitte kreuzen Sie in jeder Zeile eine Position an!

menschlich	○	○	○	○	○	○	○	technisch
isolierend	○	○	○	○	○	○	○	verbindend
angenehm	○	○	○	○	○	○	○	unangenehm
originell	○	○	○	○	○	○	○	konventionell
einfach	○	○	○	○	○	○	○	kompliziert
fachmännisch	○	○	○	○	○	○	○	laienhaft
hässlich	○	○	○	○	○	○	○	schön
praktisch	○	○	○	○	○	○	○	unpraktisch
sympathisch	○	○	○	○	○	○	○	unsympathisch
umständlich	○	○	○	○	○	○	○	direkt
stilvoll	○	○	○	○	○	○	○	stillos
voraussagbar	○	○	○	○	○	○	○	unberechenbar
minderwertig	○	○	○	○	○	○	○	wertvoll
ausgrenzend	○	○	○	○	○	○	○	einbeziehend

bringt mich den Leuten näher	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	trennt mich von Leuten
nicht vorzeigbar	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	vorzeigbar
zurückweisend	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	einladend
phantasielos	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	kreativ
gut	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	schlecht
verwirrend	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	übersichtlich
abstoßend	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	anziehend
mutig	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	vorsichtig
innovativ	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	konservativ
lahm	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	fesselnd
harmlos	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	herausfordernd
motivierend	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	entmutigend
neuartig	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	herkömmlich
widerspenstig	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	handhabbar

© AttrakDiff 2.0 (deutsch), Marc Hassenzahl, www.attrakdiff.de
Hassenzahl, M., Burmester, M., & Koller, F. (2003). AttrakDiff: Ein Fragebogen zur Messung wahrgenommener hedonischer und pragmatischer Qualität. In J. Ziegler & G. Szwillus (Hrsg.), Mensch & Computer 2003. Interaktion in Bewegung (S. 187-196). Stuttgart, Leipzig: B.G. Teubner.

Ihre Meinung

Wenn Sie Anregungen, Kritik oder Kommentare zum Versuch *(z. B. zu den Interaktionstechniken, Aufgaben oder Fragebögen)* äußern möchten oder Ihnen etwas besonders gefallen oder missfallen hat, können Sie dies hier tun.

12.10 Material der Studie 4: Untersuchung der grundsätzlichen Werkzeuggestaltung auf den Skizzierprozess

12.10.1 Anleitung und Aufgaben

Die Anleitung zur Voraufgabe ist annähernd identisch zu derjenigen der Studie 2 (Anhang 12.8.1, S. 308), jedoch wurde folgende Ergänzung aufgenommen:

Anleitung zur Voraufgabe

(...)

Als Skizzierwerkzeuge erhalten Sie einen vollständig *physischen* Stift, einen *hybriden* Stift, dessen Spitze Sie nur in der virtuellen Umgebung sehen, und einen virtuellen Stift, den sie nur in der virtuellen Umgebung sehen können und den Sie mittels eines „Datenhandschuhs“ steuern können. Die beiden Stifte sind drucksensitiv. Wenn sie auf deren oberen Bügel drücken, können Sie damit eine Linie „in die Luft“ zeichnen. Je stärker Sie drücken, desto breiter wird der Strich gezeichnet. Beim Datenhandschuh befindet sich der Drucksensor an Ihrem Zeigefinger, Sie können ihn mittels des Plättchens an Ihrem Daumen auslösen.

(...)

Anleitung zum 3D-Skizzieren mittels verschiedener Stifte

Bei den folgenden Aufgaben sollen Sie Skizzieraufgaben mit verschiedenen Stiften im dreidimensionalen Raum lösen.

Als Skizzierwerkzeuge erhalten sie einen drucksensitiven Stift in drei verschiedenen Ausführungen. Einen, der vollständig aus Material besteht (**physische Variante**), einen, der zum Teil aus Material besteht und dessen anderer Teil als Grafik zu sehen ist (**hybride Variante**) und einen, der vollständig als Grafik repräsentiert ist (**virtuelle Variante**).

Auf dem Tisch vor sich sehen Sie einen Schieberegler. Durch Verschieben des Reglers können Sie sich den Entstehungsprozess Ihrer Skizze ansehen. Sie können ihn auch benutzen, um Aktionen rückgängig zu machen. Bewegen Sie ihn dazu so lange, bis alle zu löschenden Teile Ihrer Skizze verschwunden sind, und fahren Sie dann mit dem Skizzieren fort.

Eine neue Skizze können Sie anlegen, indem Sie auf der Tastatur die Tasten „0“ - „9“ drücken. Um eine bereits erstellte Skizze wieder aufzurufen, drücken Sie die entsprechende Taste.

Falls Sie es wünschen, können Sie Papierskizzen anfertigen.

Bitte entscheiden Sie selbst, wie viele Varianten und Skizzen Sie anlegen wollen und teilen Sie dem Versuchsleiter bitte mit, wenn Sie mit der Bearbeitung der Aufgabe fertig sind.

<u>Bitte beachten Sie für alle Aufgaben folgende Randbedingungen:</u>

- **Konstruktive Details müssen** Sie in die Skizze **nicht** aufnehmen, Sie können diese jedoch andeuten.

- Die Entwürfe sollten **prinzipiell realisierbar** sein.

Die Realisierung sollte mit **bekannten Materialien** und **Fertigungstechniken** möglich sein.

Aufgabe I:

In einem ruhigen Bereich des neu zu gestaltenden Foyers des Fraunhofer Instituts sollen eine Couch und ein passender Tisch integriert werden, die bei Empfängen oder für wartende Besucher eingesetzt werden können. Das Design der Couch und des Tisches soll dem eleganten futuristischen Design des Foyers und der innovativen Forschungsausrichtung des Instituts entsprechen.

Skizzieren Sie bitte die Couch und einen passenden Tisch entsprechend dieser Beschreibung.

Aufgabe II:

Zur Förderung von Motivation und Gesundheit der Mitarbeiter des Fraunhofer Instituts soll ein Snoozle-Raum eingerichtet werden, in dem sie für zehn bis 20 Minuten verweilen, entspannen und kurz schlafen können. Dazu soll dieser Raum mit offenen Schlafkapseln ausgestattet werden, in die sich die Mitarbeiter legen können. Die Ruhephase soll im Liegen möglich sein. Zum Ein- und Aussteigen sollen die Schlafkapseln in eine bequeme Position fahren können.

Skizzieren Sie bitte eine Schlafkapsel entsprechend dieser Beschreibung.

Aufgabe III:

Zur Förderung von Motivation und Gesundheit der Mitarbeiter des Fraunhofer Instituts soll ein Snoozle-Raum eingerichtet werden. In diesem Raum wird zweimal wöchentlich eine je zehnminütige Massage für die Mitarbeiter angeboten. Dazu soll dieser Raum mit höhenverstellbaren Massagestühlen ausgestattet werden. In den Tagen, in denen die Stühle nicht genutzt werden, sollen sie leicht und raumsparend abstellbar sein.

Skizzieren Sie bitte einen Massagestuhl entsprechend dieser Beschreibung.

12.10.2 Fragebögen

Die Fragebögen sind identisch zu denen der Studie 2 (Anhang 12.8.2, S. 314), lediglich drei Fragen zur wahrgenommenen Einheit der Objekte wurden neu aufgenommen:

		trifft voll zu	trifft eher zu	teils/ teils	trifft eher nicht zu	trifft gar nicht zu
19	Das Skizzierwerkzeug erschienen mir als Einheit.	☐	☐	☐	☐	☐
20	Ich habe mich im Umgang mit der Interaktionstechnik sicher gefühlt.	☐	☐	☐	☐	☐
21	Ich konnte mit dieser Interaktionstechnik die virtuelle Realität gut kontrollieren.	☐	☐	☐	☐	☐

12.10.3 Ergebnisse der qualitativen Analyse der Benutzeräußerungen

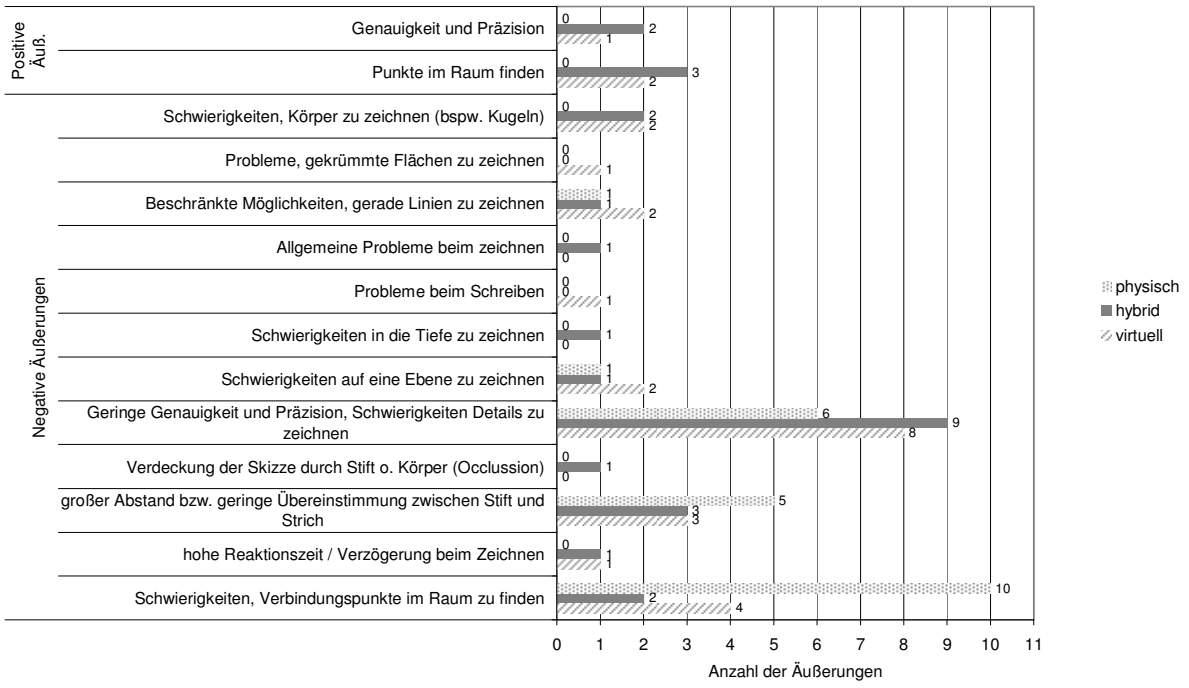


Abbildung 116: Benutzeräußerungen zur sensumotorischen Kontrolle.



Abbildung 117: Benutzeräußerungen zur Ergonomie.

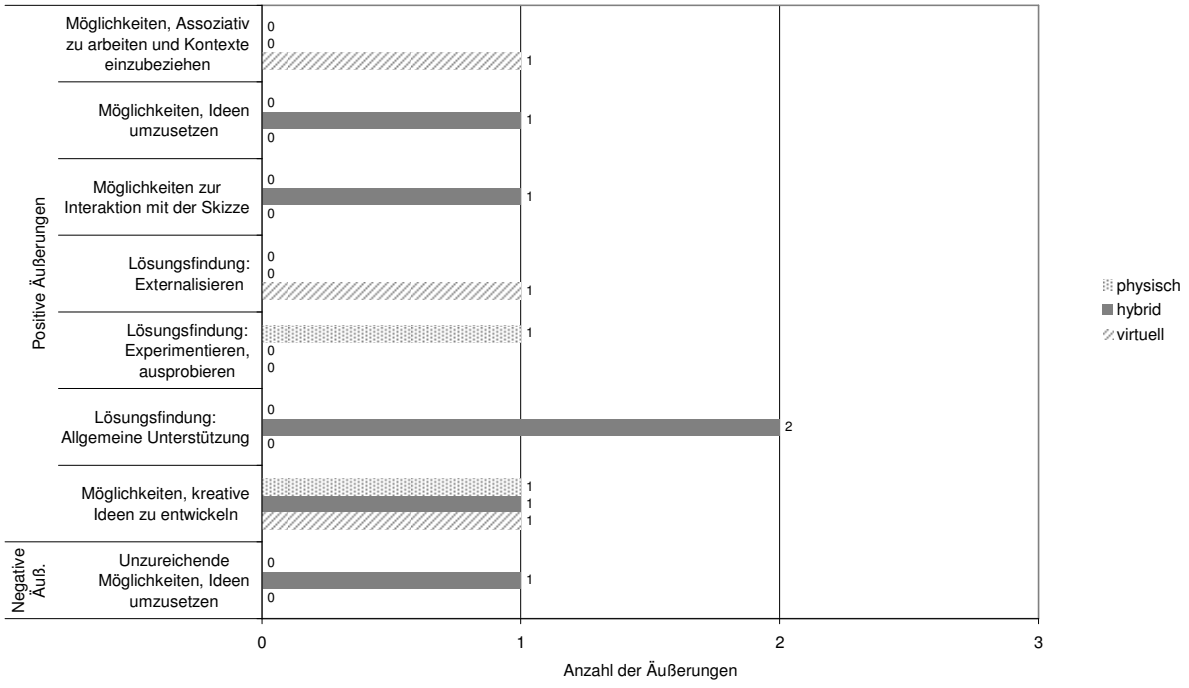


Abbildung 118: Benutzeräußerungen zur methodischen Unterstützung.

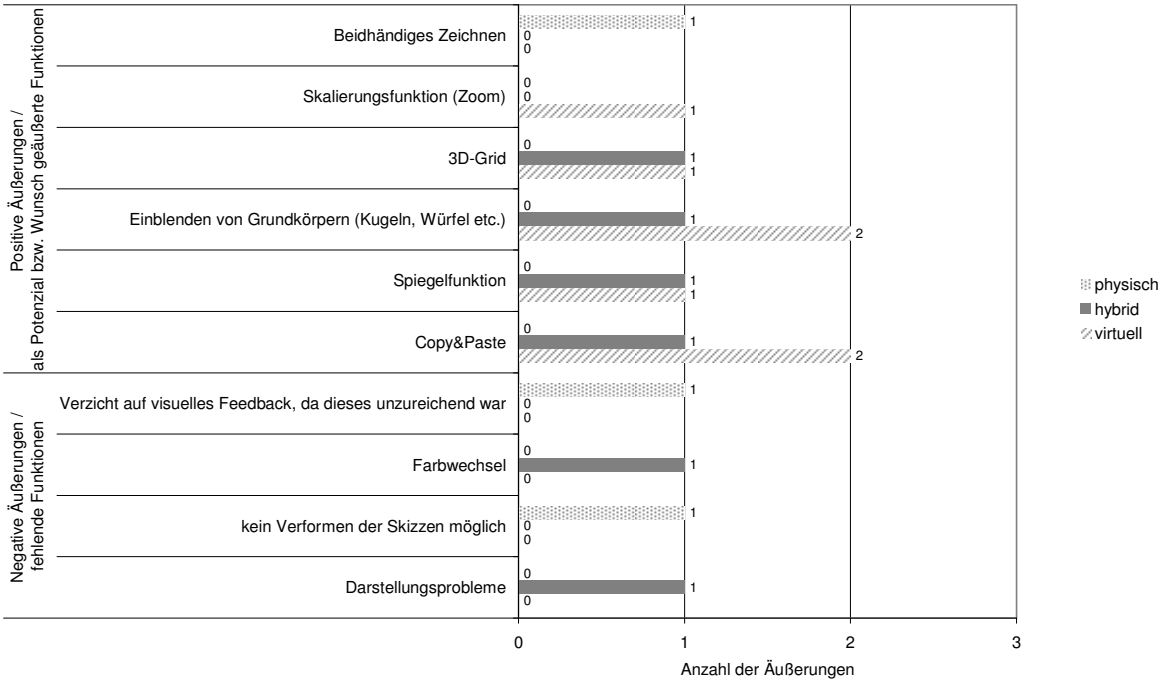


Abbildung 119: Benutzeräußerungen zu fehlenden bzw. gewünschten Funktionen.

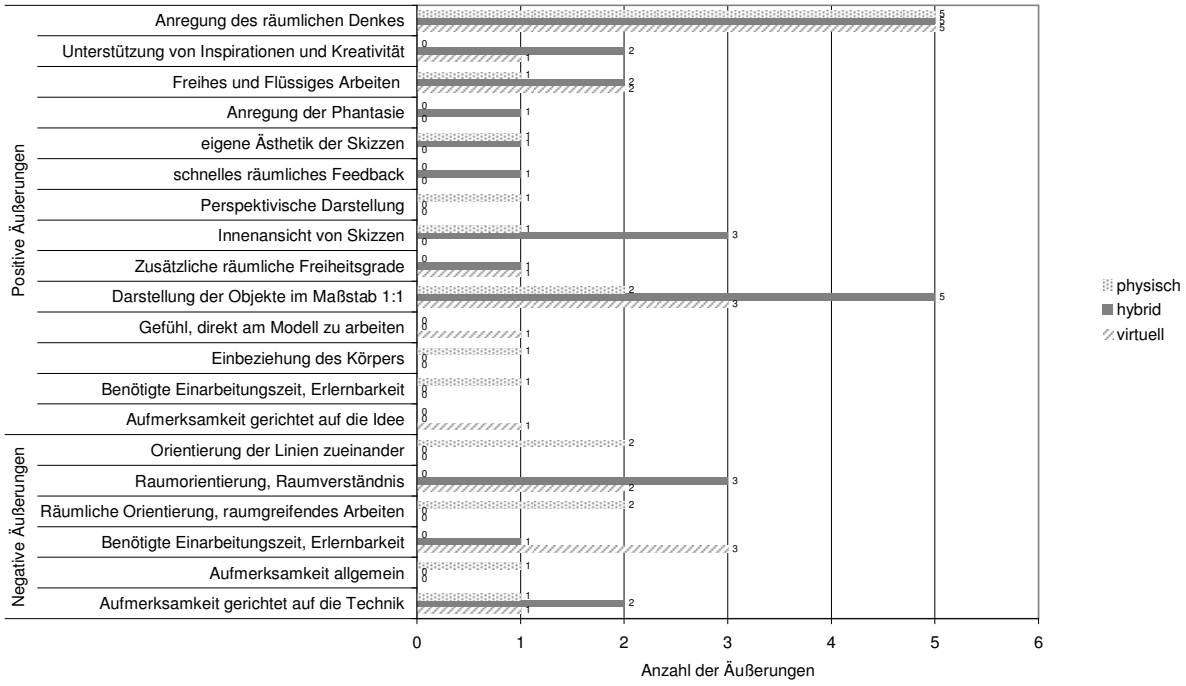


Abbildung 120: Benutzeräußerungen zum Skizzierprozess.

Neue Unterstützungsmöglichkeiten für kreative Entwurfstätigkeiten werden in dieser Arbeit durch die Verknüpfung von Virtual Reality-Technologie, begreifbaren Benutzungsschnittstellen und der Methodik des Skizzierens erschlossen. Die empirisch gewonnen Ergebnisse unterstreichen das Gewicht des immersiven Skizzierens für die zukünftige Virtuelle Produktentstehung.

ISBN 978-3-8396-0330-7

FRAUNHOFER VERLAG