

Entwicklung und Evaluation eines berührungslosen Bedienkonzeptes für eine stereoskopische maritime Lagedarstellung

Development and Evaluation of a Touchless Interaction Concept for a Stereoscopic Maritime Situation Display

Von der Fakultät für Maschinenwesen
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades
eines Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von
Nils Ronald Meyer

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Frank Flemisch
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Matthias Rötting

Tag der mündlichen Prüfung: 11. Dezember 2019

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek online verfügbar.

„In this electronic age we see ourselves being translated more and more into the form of information, moving toward the technological extension of consciousness.“

Herbert Marshall McLuhan, 1964

Teilergebnisse

- Meyer, R., Bützler, J., Dzaack, J. & Schlick, C. M. (2014a). Development of Interaction Concepts for Touchless Human-Computer Interaction with Geographic Information Systems. In M. Kurosu (Hrsg.), *Human-Computer Interaction. Advanced Interaction Modalities and Techniques* (S. 589–599). Cham: Springer International Publishing.
- Meyer, R., Bützler, J., Dzaack, J. & Schlick, C. M. (2014b). Entwicklung von Benutzungskonzepten zur berührungslosen Mensch-Computer-Interaktion in Geoinformationssystemen. In. für Arbeitswissenschaften e.V. (Hrsg.), *Gestaltung der Arbeitswelt der Zukunft* (S. 522–524). Dortmund: GfA-Press.
- Meyer, R., Bützler, J., Dzaack, J. & Schlick, C. M. (2015a). Ergonomic Design and Evaluation of a Free-Hand Pointing Technique for a Stereoscopic Desktop Virtual Environment. In G. Lindgaard & D. Moore (Hrsg.), *Proceedings 19th Triennial Congress of the IEA* (Bd. 9), International Ergonomics Association.
- Meyer, R., Bützler, J., Dzaack, J. & Schlick, C. M. (2016). Development and Evaluation of an Input Method Using Virtual Hand Models for Pointing to Spatial Objects in a Stereoscopic Desktop Environment with a Fitts' Pointing Task. In B. Deml, P. Stock, R. Bruder & C. M. Schlick (Hrsg.), *Advances in Ergonomic Design of Systems, Products and Processes* (S. 327–342). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Meyer, R., Bützler, J., Dzaack, J. & Schlick, C. M. (2015b). Bewertung virtueller Handmodelle zur Steuerung und Manipulation von 3D-Objekten in stereoskopischen Desktopumgebungen anhand einer Fitts'schen Zeigeaufgabe. In. für Arbeitswissenschaften e.V. (Hrsg.), *Verantwortung für die Arbeit der Zukunft*. Dortmund: GfA-Press.
- Meyer, R. & Dzaack, J. (2015). Entwicklung eines gestisch gesteuerten stereoskopischen Anzeigesystems zur Darstellung von Sensordaten in einer dreidimensio-

- nenalen Seekarte. In U. Freiherr von Lukas, E.-M. Mahnke & K. Bauer (Hrsg.), *Computergraphik für die Praxis* (S. 123–126). Stuttgart: Fraunhofer Verlag.
- Meyer, R., Mertens, A., Dzaack, J. & Schlick, C. M. (2016a). Analyse Motorischer und Kognitiver Einflussfaktoren auf die Performanz von Zeigebewegungen in einer Stereoskopischen Desktopumgebung. In. für Arbeitswissenschaften e.V. (Hrsg.), *Arbeit in komplexen Systemen. Digital, vernetzt, human?*, Dortmund: GfA-Press.
- Meyer, R., Mertens, A., Dzaack, J. & Schlick, C. M. (2016b). Object Manipulation by Virtual Menu Interaction Using Free-Hand Input in a Desktop Virtual Reality Maritime Situation Display. In S. Lackey & R. Shumaker (Hrsg.), *Virtual, Augmented and Mixed Reality* (S. 446–453). Cham: Springer International Publishing.

Schutzrechte

- Dzaack, J. & Meyer, R. (Anmeldedatum: 22. Mai 2014 a). *DE102014107211A1: Vorrichtung zum Anzeigen einer virtuellen Realität sowie Messgerät*. Deutschland.
- Dzaack, J. & Meyer, R. (Anmeldedatum: 22. Mai 2014 b). *DE102014107220A1: Eingabevorrichtung, Rechner oder Bedienanlage sowie Fahrzeug*. Deutschland.
- Dzaack, J. & Meyer, R. (Anmeldedatum: 22. Mai 2014 c). *WO2015176707A1: Input device, computer or operating system and vehicle*. Deutschland.
- Dzaack, J. & Meyer, R. (Anmeldedatum: 22. Mai 2014 d). *WO2015176708A1: Device for displaying a virtual reality and measuring apparatus*. Deutschland.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Zielsetzung und Themeneingrenzung	6
1.2	Vorgehensweise	6
2	Grundlagen	9
2.1	Virtuelle Umgebungen	9
2.2	Menschliche Informationsverarbeitung	11
2.2.1	Visuelle Wahrnehmung	12
2.2.2	Tiefenhinweise	15
2.2.3	Situational Awareness in Lagedarstellungen	24
2.2.4	Das Fitts'sche Gesetz	26
2.3	Die Menschliche Hand	29
2.4	Neuroergonomische Grundlagen zur Gestaltung von virtuellen Handmodellen	31
2.5	Anzeigesysteme	36
2.5.1	Bildsynthese	37
2.5.2	Dreidimensionale Anzeigegeräte für Desktopsysteme	39
2.6	Eingabesysteme	43
2.7	Auswahltechniken für erweiterte und virtuelle Umgebungen	45
2.7.1	Manipulationsverfahren	48
2.7.2	Zielobjekte	56
2.8	Immersive Informationsdarstellung und Maritime Datenvisualisierung	57
2.9	Expertenbefragung	67
2.9.1	Unterwasserbereich	72
2.9.2	Überwasserbereich	73
2.9.3	HMI der Zukunft	74
2.9.4	Anwendungsfälle	75

3	Entwicklung eines interaktiven stereoskopischen Systems zur Datenanzeige	77
3.1	Iterativ-Partizipative Vorgehensweise	78
3.2	Anforderungen	79
3.3	Software-Rahmenwerk	79
3.4	Systemkonzeption	80
3.4.1	Beschreibung des Gesamtsystems	82
3.4.2	Aufbau der Interaktionsumgebung	85
3.4.3	Gestaltung der Handmodelle	85
3.4.4	Entwicklung eines Interaktionsdialogkonzeptes für eine Stereo- skopische Desktopumgebung	86
3.5	Auswahl der Middleware	93
3.5.1	Open Inventor Framework	98
3.5.2	Leap Motion Sensor	100
3.5.3	.NET Framework	102
3.6	Implementierung	102
3.6.1	Software-Architektur	103
3.6.2	Implementierung der Handmodelle	105
3.6.3	Implementierung des Interaktionsdialoges	107
3.6.4	Ergebnis der prototypischen Implementierung	107
3.7	Forschungsfragen und Abgeleiteter Forschungsbedarf	111
4	Empirische Untersuchungen	113
4.1	Übergeordnete Methodik	113
4.1.1	Fitts'sche Zeigeaufgabe	114
4.1.2	Pre- und Post-Tests	114
4.1.3	Softwaremodul zur Zeit- und Datenerfassung	117
4.1.4	Körperliche Belastungs- und Beanspruchungsmessung	118
4.1.5	Versuchsanordnung	120
4.1.6	Versuchsprototyp	122
4.1.7	Statistische Datenauswertung	123
4.2	Versuchsreihe A	126
4.2.1	Ziel und Methodik	128
4.2.2	Versuchsdesign	130
4.2.3	Unabhängige Variablen	131

4.2.4	Abhängige Variablen	134
4.2.5	Versuchsdurchführung	134
4.2.6	Versuchshauptaufgabe	136
4.2.7	Stichprobe	136
4.2.8	Hypothesen	138
4.2.9	Ergebnisse des Hauptversuches A	141
4.2.10	Diskussion	157
4.3	Versuchsreihe B	160
4.3.1	Ziel und Methodik	161
4.3.2	Versuchspersonen	175
4.3.3	Versuchsdesign	176
4.3.4	Versuchsdurchführung	177
4.3.5	Versuchshauptaufgabe	179
4.3.6	Unabhängige Variablen	180
4.3.7	Abhängige Variablen	180
4.3.8	Hypothesen	181
4.3.9	Ergebnisse der Pre- und Posttests	185
4.3.10	Ergebnisse des Hauptversuches B	187
4.3.11	Diskussion	206
5	Schlussfolgerungen und Gestaltungsempfehlungen für die Praxis	211
6	Zusammenfassung und Ausblick	215
	Literaturverzeichnis	219

Abstract

Innovative sensor technology and new methods for data acquisition and its combination provide data sets in real time in such a way that they can be represented in three spatial dimensions. Both acoustic underwater sensors and electromagnetic sensors can be used to generate triangulated spatial data sets in high resolution. Three-dimensional display systems such as stereoscopic displays or head mounted virtual and augmented reality displays may visualize spatial data with their original dimension. To interact with the displayed data in their natural representation of three dimensions, classical input methods such as mouse and joysticks are still used frequently. These input methods lack of the absence of a third input dimension and therefore may not be intuitive or are difficult to use. Recently, a trend towards so-called natural interaction paradigms can be observed in human computer interaction, in which users can directly manipulate virtual objects by using touch-sensitive input systems such as tablet computers or smartphones. In this work a touchless interaction concept for a stereoscopic desktop environment is developed by „mid air“ interaction for manipulating data in a maritime situation display is developed and investigated. The concept is based on scenarios which are developed in cooperation with maritime experts. The resulting prototype is investigated from a human computer interaction perspective and evaluated in regard of ergonomic factors.

Kurzfassung

Durch verbesserte Sensortechnik und neue Verfahren zur Datenerfassung liegen Datensätze immer häufiger so vor, dass eine Darstellung in drei räumlichen Dimensionen umsetzbar ist. Sowohl mit akustischen Unterwassersensoren als auch elektromagnetischen Sensoren ist die Erzeugung räumlicher Datensätze bereits in hoher Auflösung möglich. Dreidimensionale Anzeigesysteme wie stereoskopische Displays oder kopfbasierte Anzeigesysteme der erweiterten und virtuellen Realität dienen zur dimensionsgetreuen Wiedergabe solcher Datensätze. Um mit den angezeigten Datensätzen in der Dreidimensionalität interagieren zu können, werden derzeit häufig noch klassische Eingabemethoden wie die Maus- oder Joystickeingabe verwendet, die jedoch für dreidimensionale Anzeigesysteme als nicht intuitiv oder die Benutzung als schwierig empfunden wird. Seit Jahren ist bei der Entwicklung von Eingabemethoden ein Trend zur sogenannten natürlichen Interaktion zu beobachten, bei der Nutzer direkte Manipulationen an virtuellen Objekten vornehmen können, wie beispielsweise bei berührungsempfindlichen Eingabesystemen wie Tabletcomputern oder Smartphones. In der vorliegenden Arbeit werden berührungslose Eingabemethoden zur Datenmanipulation über sogenannte „Mid Air“ Interaktion in stereoskopischen Desktopumgebungen am konkreten Beispiel der maritimen Lagedarstellung untersucht. Im Verlauf der Arbeit werden gemeinsam mit Experten aus dem maritimen Umfeld Konzepte und Szenarien zur Entwicklung einer stereoskopischen maritimen Lagedarstellung erörtert und anschließend umgesetzt. Der daraus entstehende Prototyp wird arbeitswissenschaftlichen Untersuchungen unterzogen und eine abschließende Bewertung unter Berücksichtigung ergonomischer Fragestellungen vorgenommen.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit wäre ohne die Unterstützung einer Reihe von Personen nicht möglich gewesen. Ein ganz besonderer Dank gilt meinem betreuenden Prof. Dr.-Ing. Frank Flemisch, der die Betreuung meiner Promotionsarbeit von Prof. Dr.-Ing. Christopher M. Schlick übernommen und mich in die Abteilung Systemergonomie aufgenommen hat. Mit ihm als Doktorvater wurde diese Arbeit zu einem erfolgreichen Ende geführt. Posthum möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Christopher M. Schlick bedanken. Mit ihm wurde diese Arbeit ins Leben gerufen und das Konzept hergeleitet. Ein besonderer Dank gilt auch Prof. Dr.-Ing. Matthias Rötting für die Übernahme der Zweitgutachterschaft und Prof. Dr. Werner Lehnert für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes. Ein großer Dank gilt auch den Kollegen der Abteilung Systemergonomie, die mir während der Fertigstellung dieser Arbeit stets den Rücken freigehalten und mich seelisch unterstützt haben: Ralph Baier, Nicolas Herzberger, Julia Spies, Marcel Usai, Gina Weßel und den Kollegen Marvin Goppold und Henning Petruck sowie den ehemaligen Kollegen Eugen Altendorf, Yigiterkut Canpolat und Fabian Eckert. Herzlich gedankt sei auch meiner ehemaligen studentischen Hilfskraft Viktoria Pallacks für die Durchführung der Probandenversuche und der tatkräftigen Unterstützung. Desweiteren möchte ich allen weiteren Kolleginnen und Kollegen und studentischen Hilfskräften danken, die durch konstruktive Kritik zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Ein besonderer Dank gilt Jeronimo Dzaack, der als Schnittstelle zwischen allen Instanzen und Abteilungen des Industriepartners stets zur Verfügung stand und diese Arbeit inhaltlich und organisatorisch ermöglichte und jederzeit mit großer Motivation unterstützt hat. Von ganzem Herzen danke ich auch meinen Eltern, die mir das Studium ermöglicht haben und dadurch auch die Promotion.

Vor allem jedoch danke ich meiner Frau Janine, die mir für die Umsetzung dieser Arbeit stets Motivation und Kraft gegeben, immer ein offenes Ohr und mir den Rücken freigehalten, und an mich und den Erfolg dieser Arbeit bis zuletzt geglaubt hat, und unserem kleinen Sohn Jaron: Sie beide tragen einen großen Teil des Erfolges mit ihrer liebevollen Unterstützung und ihrem Verständnis zu dieser Arbeit bei.

Aachen, 19. Dezember 2019

1. Einleitung

Neue Technologien verändern unsere Gesellschaft und unsere Arbeitswelt. Die Einflüsse einer immer weiter fortschreitenden Digitalisierung wurden bereits seit ihrer Entstehung erkannt, unter anderem von Herbert Marshall McLuhan, dessen These aus seinem Werk „Understanding Media: The Extensions of Man“ diese Schrift einleitet. McLuhan verstand den Menschen als organische Einheit, die „durch Wahrnehmungsfähigkeit und Sinne, durch Verstand und unmittelbare körperliche Möglichkeiten wie Greifen oder Gehen geprägt ist“ (Sander, Von Gross & Hugger, 2008). Medien sind aus McLuhans Perspektive „eine Erweiterung der Sinne“. Nach Marshall McLuhan schreitet diese Erweiterung der Sinne immer weiter fort und er unterzog diese Entwicklung fortwährend einer kritischen Analyse aus der Sicht eines Philosophen und Medientheoretikers. McLuhans Aussage „In this electronic age we see ourselves being translated more and more into the form of information, moving toward the technological extension of consciousness.“ (zu deutsch „In diesem elektronischen Zeitalter beobachten wir eine fortschreitende Umwandlung unseres Selbst in Information, auf dem Weg in die technologische Erweiterung unseres Bewusstseins.“) aus dem Jahre 1964 deutet schon zur damaligen Zeit an, dass McLuhan den Trend der zunehmenden Digitalisierung bereits erkannt hatte. Dieser Trend setzt sich heute mit „Social Media“ und „Industrie 4.0“ sowohl auf der sozialen Ebene im Umgang des Menschen miteinander und in der Arbeitswelt von Heute und Morgen stärker fort denn je. Mit immer mehr Rechenleistung, Speicherkapazität und sich stetig verbessernder Sensortechnik, multimodaler und multimedialer Darstellungstechniken, schreitet die Digitalisierung der realen Welt zunehmend voran. Der Trend zeigt in Richtung einer Verschmelzung zwischen menschlichem Bewusstsein und abstrahierter, digitaler Welt. Technologische Ansätze wie erweiterte und virtuelle Realität verschmelzen reale und digitale Welt und sind heute Teil des von McLuhan damals beschriebenen Trends. Die künstliche Welt lässt sich mit verbesserter Technologie immer realistischer darstellen

und wird zunehmend interaktiver. Die Verwendung von Gleichnissen oder Metaphern aus der realen Welt in einer virtuellen Welt, ist, auch um dem von McLuhan beschriebenen Trend zu folgen, naheliegend. Ist das Gleichnis oder die Metapher gut gestaltet und entspricht sie dem bekannten Gleichnis aus der realen Welt, so kann sie dem Benutzer eine intuitive Interaktionsmöglichkeit mit der künstlichen Welt bieten und der intuitiven Benutzung eines digitalen Systems dienen. Dieser Ansatz wird auch als „naturalistische Interaktion“ bezeichnet (Bowman, 2005). Bei der Gestaltung von interaktiven Systemen wird der Mensch zunehmend als Teil des Systems verstanden und nicht nur als Systemnutzer oder als Erzeuger von Eingabeparametern. Ein System wird als eine Ansammlung von miteinander in Beziehung stehenden Teilen verstanden (Haberfellner, de Weck, Fricke & Vössner, 2015). Als Teil- oder Subsystem wird jedes Element bezeichnet, welches in irgendeiner Form mit anderen Teilen in Verbindung steht - also eine Interkonnektivität herrscht. Die Summe aller Teilsysteme bildet das Gesamtsystem, welches auch mit der Umwelt oder anderen Umsystemen in Verbindung steht. Der Mensch als Subsystem und Teil des Gesamtsystems erschafft wiederum Systeme, welche Lösungsansätze für bestimmte Problemstellungen sein können. Nach Haberfellner et al. (2015) werden Systeme und Lösungen also von Menschen für Menschen gemacht bzw. verändert. Moderne Ansätze in der Mensch-Maschine-Interaktion haben den Systemgedanken konsequent verfolgt, und den Menschen bei der Gestaltung von Interaktion zwischen Mensch und Maschine immer mehr als Teil des Gesamtsystems in Betracht gezogen. Dieser Trend entwickelt sich fort, indem die Entwicklung von Mensch-Maschine-Schnittstellen auf die Entwicklung von Systemen gelenkt wird, bei der eine für den Menschen natürliche Art der Interaktion mit interaktiven Systemen erfolgt. Dabei ist die Art der Natürlichkeit so zu verstehen, dass für den Menschen alltägliche Interaktionsmuster aus der realen Welt auf die Interaktion mit Maschine-Systemen angewendet werden sollen. Die alltägliche Interaktion des Menschen mit seiner Umwelt, also vor der des Menschen bekannten Systemgrenze, fließt zunehmend in die Interaktion zwischen Mensch und Maschine mit ein und diese natürliche, bekannte Grenze wird auf die Mensch-Maschine-Interaktion zunehmend übertragen. Dieser Trend wird als anthropozentrischer Ansatz verstanden, dessen konsequente Umsetzung den Mensch als interagierendes Individuum als Teil des Systems erkennt und damit ein ausbalanciertes System aus den Teilsystemen Mensch und interaktives technisches System schafft. Der Mensch ist Teil des Gesamtsystems (vgl. dazu Flemisch et

al. (2012)) Diese Herangehensweise lässt sich auf beinahe jede Systementwicklung anwenden. Wichtig hierbei ist ein analytisches Verständnis der Interaktion des Menschen mit Systemen im Alltag und eine Herstellung von Isomorphismen in beteiligten Subsystem des technischen Teilsystems.

Die Gestaltung von Mensch-Computer-Schnittstellen ist inzwischen unter der DIN EN ISO Norm „Ergonomische Anforderungen Der Mensch-System-Interaktion, Teil 210: Prozess Zur Gestaltung Gebrauchstauglicher Systeme“ beschrieben. Nach den dieser Norm festgehaltenen Vorgaben soll ein System so gestaltet sein, dass eine Anpassung des interaktiven Systems an die Interaktionsbedürfnisse und -fähigkeiten des Menschen erlangt wird und die Anpassung des Menschen an die Maschine nicht mehr notwendig ist. Die Vorteile dieser sogenannten anthropozentrischen Systementwicklung resultieren in eine nachweislich geringere kognitive Beanspruchung des Menschen bei der Bearbeitung von Arbeitsaufgaben und eine Steigerung der Ergonomie. Die dadurch entstehende Reduzierung der geistigen und körperlichen Beanspruchung der Arbeitsperson halten diese länger motiviert und körperlich sowie geistig gesund und die Kapazität zur Bearbeitung der Arbeitsaufgabe wird nachhaltig gesteigert. Ein weiterer Effekt ist die Reduzierung von Anlernzeiten zur Benutzung eines anthropozentrisch gestalteten Systems, da sich Ein- und Ausgabe des Systems an den Fähigkeiten des Nutzers orientieren können. Demnach ergeben sich durch den Prozess der menschenzentrierten Entwicklung erhebliche ökonomische und soziale Vorteile für Anwender und Entwickler. Die dadurch in hohem Maße gebrauchstauglichen Systeme und Produkte sollen in technischer als auch in kommerzieller Hinsicht tendenziell erfolgreicher sein und dadurch einen wirtschaftlichen Vorteil bieten. Menschzentrierte Verfahren verringern beispielsweise gesundheitliche Risiken, und steigern die Systemqualität, zum Beispiel (Auszüge aus der DIN EN ISO 9241-210 (2011)):

- ...durch die Steigerung der Produktivität der Benutzer und der Wirtschaftlichkeit von Organisationen;
- ...dadurch, dass sie leichter zu verstehen und zu benutzen sind, wodurch die Kosten für Schulung und Betreuung verringert werden;
- ...durch Erhöhung der Gebrauchstauglichkeit für Menschen mit einer größeren Bandbreite von Fähigkeiten und der dadurch erhöhten Zugänglichkeit;

- ...durch Verbesserung der User Experience;
- ...durch Reduzierung von Unbehagen und Stress;
- ...dadurch, dass sie einen Wettbewerbsvorteil verschaffen, zum Beispiel durch Schärfen des Markenbilds;
- ...durch Beiträge zum Erreichen von Nachhaltigkeitszielen.

Die DIN EN ISO 9241-210 (2011) sieht neben der Gestaltung eines Systems sowie der Rollenverteilung bestimmte Grundsätze vor:

- ...die Gestaltung beruht auf einem umfassenden Verständnis der Benutzer, Arbeitsaufgaben und Arbeitsumgebungen;
- ...die Benutzer sind während der Gestaltung und Entwicklung einbezogen;
- ...das Verfeinern und Anpassen von Gestaltungslösungen wird fortlaufend auf der Basis benutzerzentrierter Evaluierung vorangetrieben;
- ...der Prozess ist iterativ;
- ...bei der Gestaltung wird die gesamte User Experience berücksichtigt;
- ...im Gestaltungsteam sind fachübergreifende Kenntnisse und Perspektiven vertreten.

Hierdurch wird zwischen Nutzer und System eine Wechselwirkung geschaffen, in der Nutzerperspektiven, technische und organisatorische Perspektiven ausbalanciert zwischen Mensch und Maschine wirken können, wodurch die Interaktion des Menschen mit dem System perfektioniert wird. Bevor jedoch eine Perfektionierung stattfinden kann, muss bei der Gestaltung des Systems eine Vielzahl von Spannungsfeldern berücksichtigt werden. Werden Spannungsfelder bereits bei der Planung des Systems, also bei der Systemgestaltung identifiziert, und bei der Planung des Systems berücksichtigt, können Schwächen frühzeitig erkannt werden und tauchen nicht erst in der praktischen Benutzung des Systems auf, möglicherweise auch nicht erst dann, wenn es durch Systemversagen zu einem nicht erwünschten Vorfall kommt. Die vorliegende Dissertationsschrift zeigt den Gesamtprozess der Gestaltung einer Anwendung nach dem anthropozentrischen Ansatz zur Systemgestaltung am konkreten Beispiel von

maritimen Geoinformationssystemen und Lagedarstellungen der virtuellen Realität auf Desktopsystemen. Hierzu wurde ein Konzept für eine prototypische Anwendung erarbeitet, welches gemeinsam mit einer Expertengruppe unter Berücksichtigung des zuvor beschriebenen Ansatzes entwickelt wird. Das Konzept wurde anschließend in Teilen umgesetzt und aus arbeitswissenschaftlicher Sicht evaluiert. Die Arbeitswissenschaft ist laut DIN EN ISO 9241-210 (2011) eine „wissenschaftliche Disziplin, die sich mit dem Verständnis der Wechselwirkungen zwischen menschlichen und anderen Elementen eines Systems befasst, und der Berufszweig, der Theorie, Prinzipien, Daten und Methoden auf die Gestaltung von Arbeitssystemen anwendet mit dem Ziel, das Wohlbefinden des Menschen und die Leistung des Gesamtsystems zu optimieren.“ Da ein System zur Datenanzeige erzeugt werden soll und Datenströme, welche mit Sensortechnologien wie Radar und Sonar durch Triangulation von Messwerten potentiell in drei räumlichen Dimensionen vorliegen und somit eine dreidimensionale Ausgabe der aufgezeichneten Daten ermöglichen, wird eine räumliche Darstellung als Grundlage des zu erarbeitenden Konzeptes gerückt. Die Herausforderung bei der Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle besteht darin, dem Anwender auf leichte und intuitive Art die Möglichkeit der Exploration und Analyse entsprechender Datensätze zu bieten. Da räumliche Datensätze in ihrer Dimensionalität so originalgetreu wie möglich und so abstrakt wie nötig dargestellt werden sollten, ist bei der Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle die Möglichkeit gegeben, einfache mentale Modelle als Grundlage bei der Gestaltung des Interaktionsmediums einzusetzen, die bei Nutzern in der Regel durch die Interaktion mit der Alltagswelt bereits vorhanden sind und somit nicht mehr erlernt werden müssen. Dieses Paradigma der Interaktionsgestaltung wird als „naturalistische Interaktion“ verstanden und ermöglicht Nutzern die leichte Erlernbarkeit bei der Benutzung von interaktiven Systemen. Die Darstellung dreidimensionaler Datensätze mit dreidimensionalen Anzeigesystemen erfordern ohnehin ein neues Interaktionsparadigma für die Interaktion mit solchen, da klassische Zeigergeräte wie die Computermouse durch die zweidimensionale Eingabe nicht zuletzt durch räumliche Faktoren und eine fehlende Dimension begrenzt sind. Durch die natürliche und direkte Interaktion und eine dreidimensionale Darstellung soll eine höhere Effizienz bei der Auswertung von Daten erzielt werden, wenn diese dem Betrachter so dargeboten werden, wie aus der realen Welt bekannt.

1.1 Zielsetzung und Themeneingrenzung

Ziel der Arbeit sind Konzept und Gestaltung eines maritimen Systems zur Datenein- und -ausgabe, welches in der Lage ist, räumliche Datensätze in drei Dimensionen sowie stereoskopisch darzustellen und Nutzern ein Eingabesystem bereitzustellen, welches nach den Prinzipien der sogenannten „Natürlichen Interaktion“ funktioniert. Durch die stereoskopische Darstellung von räumlichen Datensätzen kann die Immersion des Nutzers in die virtuelle Welt gesteigert werden und so das Situationsbewusstsein erhöhen. Hierzu werden die Erstellung eines Konzeptes für die Datenanzeige sowie die Erstellung eines Interaktionskonzeptes vorgenommen, welches intuitiv und natürlich vom Nutzer verstanden und bedient werden können soll. Die Interaktion mit dem virtuellen System soll möglichst isomorphistisch mit der natürlichen Interaktion aus der dem Nutzer bekannten realen Welt funktionieren. Ziel dabei sind Gestaltungsempfehlungen für die Interaktion durch sogenannte „Mid Air“ Interaktionen in stereoskopischen Desktopumgebungen am Beispiel einer stereoskopisch visualisierten Seekarte und die Evaluation des darauf aufgebauten Interaktionskonzeptes aus arbeitswissenschaftlicher Perspektive. Zur Gestaltung gehört die Anwendung der bereits erwähnten Mensch-zentrischen Gestaltung des Systems und die prototypisch Systemgestaltung sowie eine anschließende ergonomische Bewertung. Die Bewertung der prototypischen Umsetzung wird als arbeitswissenschaftliche Fragestellung und übergeordneten Forschungsfrage aufgetan, die mit der Überprüfung der Umsetzbarkeit des geplanten Systems aus aktueller technischer Machbarkeit bewertet wird. Zur Entwicklung des Systems wird mit aktuellen Normen zur Mensch-zentrischen Systemgestaltung sowie mit dem aktuellen Stand der Forschung gearbeitet.

1.2 Vorgehensweise

Zur Beantwortung der übergeordneten Forschungsfrage werden in dieser Arbeit theoretische Grundlagen in Kapitel Literaturgrundlagen dargelegt, die mit der Beschreibung der Wahrnehmungsfähigkeiten des Menschen beginnen. Im weiteren Verlauf der Arbeit auf Grundlagen der Mensch-Maschine-Interaktion eingegangen. Weiterhin werden aktuelle Entwicklungen auf dem Anwendungsgebiet des Einsatzes neuer Technologien in maritimen Führungssystemen und zur Datenanzeige beschrieben.

Dazu gehören sowohl die Visualisierung von Daten in maritimen Führungssystemen als auch die Bearbeitung, Manipulation und Aufbereitung der Daten.

Aus dem aktuellen Stand der Forschung wird für das weitere Vorgehen theoretische Anwendungsgebiete herausgearbeitet. Für die Systementwicklung und die Grundlagen der möglichen Anwendungsszenarien wird eine Expertenbefragung mit Experten aus dem maritimen Bereich in Kapitel 2.9 durchgeführt. Die Expertenbefragung wird mit Experten aus dem Bereich der Überwasser- dem Unterwasserschifffahrt des Herstellers für maritime Elektronik „ATLAS ELEKTRONIK GmbH“ geführt, wobei theoretische Grundlagen speziell vor dem Hintergrund der Interaktion mit geographischen Datensätzen sowie der Interaktion mit Geoinformationssystemen aus der Seefahrt eingegangen wird. Ziel der Expertenbefragung ist ein im weiteren Verlauf der Arbeit zu erarbeitendes Systemkonzept zur Erstellung eines Prototyps, dessen Entwicklung in Kapitel 3 beschrieben wird. Ein visuelles Konzept zur Anzeige des Datenmaterials ergibt sich zum einen aus den Anforderungen, die aus der Analyse der Expertenbefragung abgeleitet werden und zum anderen aus der Analyse des aktuellen Forschungsstandes bezüglich anthropozentrischer Schnittstellenentwicklung die im wesentlichen durch die Norm (DIN EN ISO 9241-210, 2011) bestimmt ist. Die Erstellung des Konzeptes schließt die Zusammenstellung der notwendigen Hardwarekomponenten sowie die Auswahl des softwaretechnischen Rahmens für die Implementierung mit ein. Die erarbeiteten Anwendungsfälle sind im Prototyp implementiert und dienen teilweise als Forschungsgegenstand. Bestimmte Teilprozesse der Entwicklung über den Gesamtprozess werden dazu mehrfach iteriert. Dabei wurden potentielle Anwender und Experten in die Entwicklung einbezogen, indem ihnen Entwicklungsabschnitte in sukzessive stattfindenden Treffen während der Entwicklung zum Testen vorgestellt wurden. Für die Implementierung wurde eine geeignete Entwicklungsumgebung sowie ein geeignetes „Software-Framework“ ausgewählt, das möglichst viele der gegebenen Anforderungen bereits erfüllt. Durch die Nutzung sogenannter „Middleware“¹, die bereits eine Reihe der angeforderten Funktionalitäten unterstützt, kann Entwicklungsaufwand eingespart werden. Für die Gestaltung des Systems werden im Verlauf der vorliegenden Arbeit Anforderungen an Hard- und Softwaresysteme erörtert und mit einer Programmierschnittstelle

¹Englischer Begriff, der eine Sammlung bestimmter Softwarekomponenten beschreibt, mit der komplexe Endbenutzersoftware schneller erstellt werden kann, da Grundfunktionalitäten aus der Sammlung verwendet werden können.

und den notwendigen COTS-Systemen zu einem Prototyp entwickelt. Auf Basis der aus der Expertenbefragung gegebenen Anforderungen wird eine Middleware ausgewählt, die um die nicht vorhandenen, aber notwendigen Schnittstellen und Softwarepakete erweitert wird. Das Konzept für die Mensch-Maschine-Schnittstelle wird gleichermaßen auf Grundlage des ermittelten Forschungsstandes und gemäß den Anforderungen, die aus den Expertenbefragungen hervorgehen, entwickelt und in Software implementiert. Die Vorgehensweise zur Erstellung des Prototypen erfolgt partizipativ-iterativ. Endnutzer und Experten werden in den Entwicklungsprozess von Funktionen zum Zeitpunkt der Konzeption und in den iterativen Entwicklungsphasen mit eingebunden. Für die Entwicklung wird die Vorgehensweise des V-Modells angewendet (Broy & Rausch, 2005). Vorgaben der DIN EN ISO 9241-210 (2011) fließen mit in das Konzept ein. Für die ergonomische Evaluierung werden empirische Daten in Probandenversuchen erfasst und anschließend quantitativ und qualitativ analysiert. Die empirischen Studien leiten sich aus wissenschaftlichen Fragestellungen aus der Arbeitswissenschaft ab. Dazu werden zwei Studien durchgeführt, deren Methodik und Vorgehensweise in dieser Arbeit beschrieben werden. Die Testumgebung bildet die prototypische, dreidimensionalen maritime Lagedarstellung, in der Szenarien aus dem Über- sowie Unterwasserbereich gleichermaßen betrachtet werden können. Anschließend folgt ein Gesamtfazit aus den empirischen Untersuchungen in Kapitel 4. Den Abschluss dieser Arbeit bilden eine abschließende Diskussion der behandelten wissenschaftlichen Fragestellungen in Kapitel 4.3.11 sowie ein Gesamtfazit mit abgeleiteten Gestaltungsempfehlungen in Kapitel 5 und Ausblick in Kapitel 6.

2. Grundlagen

Im folgenden Kapitel werden Grundlagen zur Entwicklung des Konzeptes der maritimen Lagedarstellung beschrieben. Dazu wird zuerst auf die Grundlagen virtueller Umgebungen eingegangen und anschließend die menschliche Informationsverarbeitung beschrieben. Anschließend werden die Grundlagen für die Entwicklung des Eingabekonzeptes der „naturalistischen Interaktion“ beschrieben. Dazu wird auch auf verschiedene Manipulationsverfahren zum Einsatz in virtuellen Welten eingegangen. Anschließend wird auf Anwendungen der erweiterten und virtuellen Realität im maritimen und nicht-maritimen Kontext eingegangen. Das Kapitel wird mit der Expertenbefragung und den daraus resultierenden Ergebnissen abgeschlossen.

2.1 Virtuelle Umgebungen

Erweiterte und Virtuelle Umgebungen werden als durch Computergrafik generierte Welten definiert, mit der ein Benutzer in Interaktion treten kann. Der Übergang zwischen Realität und Virtualität kann dabei fließend sein, wie das Virtual-Reality-Kontinuum nach Milgram und Colquhoun (1999) zeigt (vgl. Abbildung 2.1).

Der Grad an Realismus ist vom Anwendungskontext abhängig und sollte für jedes Szenario nach Anforderung und gegebenen technischen Möglichkeiten gewählt werden. Um eine Entscheidung zu erleichtern, kann das Prinzip des naiven Realismus mit in Betracht gezogen werden, welches von Smallman und John (2005) beschrieben wurde. Nach diesem Prinzip ist ein hoher Grad an visuellem Realismus nicht zwangsläufig notwendig, um dem Betrachter ein stärkeres Eintauchen in die virtuelle Welt zu ermöglichen. Der Fokus bei der Gestaltung sollte stattdessen auf Erfüllung der Anforderungen der Zielgruppe des zu gestaltenden Systems liegen, die eine abstrakte Darstellung von Information häufig gegenüber einer realistischen Darstellung präferiert. Eine realistische Darstellung von Wetterverhältnissen für Dar-

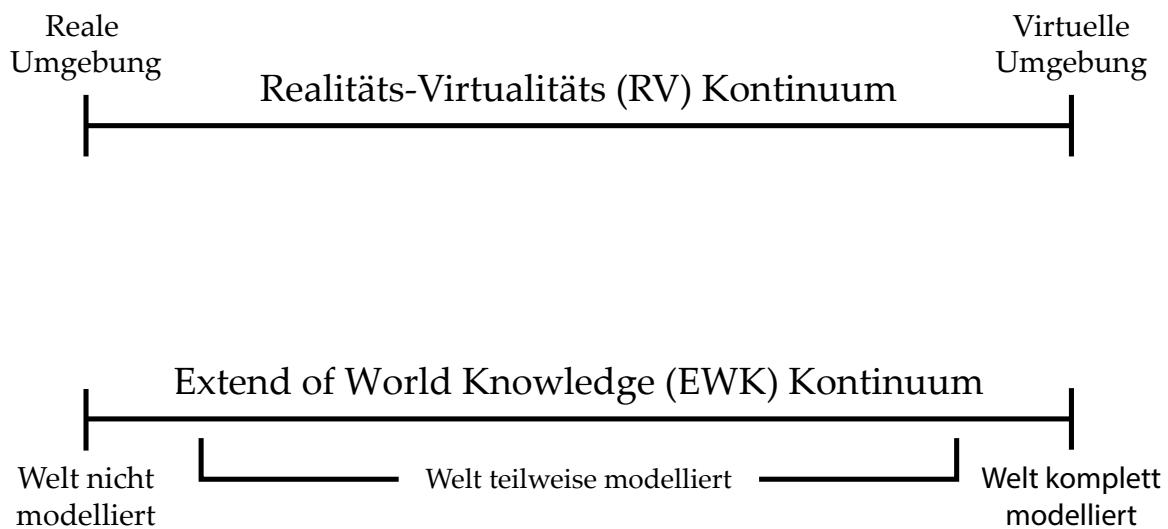


Abbildung 2.1: Virtual-Reality-Kontinuum nach Milgram und Colquhoun (1999)

stellungssysteme von Schiffsbrücken auf hoher See beispielsweise erhöht zwar den Grad an Realismus einer virtuellen Darstellung, ist jedoch bei der Darstellung von Umgebungsinformation als Störfaktor zu werten. Für Simulationszwecke in einem Schiffssimulator ist eine realistische Darstellung jedoch unabdingbar, da gerade auf diese Weise eine stärkere Immersion erzeugt werden kann, um den Betrachter in eine möglichst realistische Situation hinein zu versetzen und um damit erst den Lerneffekt einer Simulation zu erzeugen.

Im Allgemeinen sind für die Darstellung von Systemen der erweiterten und virtuellen Realität drei Aspekte nach Burdea und Coiffet (2003) notwendig, die bei der Umsetzung berücksichtigt werden. Die bereits erwähnte **Immersion** definiert den möglichst natürlichen Umgang des Menschen mit der virtuellen Umgebung. Dabei sind sowohl die Wahrnehmungsdimension des Betrachters entscheidend, als auch die Dimensionalität der virtuellen Umgebung selbst. Je mehr Wahrnehmungskanäle des Betrachters angesprochen werden, desto tiefer taucht der Betrachter in die virtuelle Welt ein. Die Wahrnehmungskanäle auf der Betrachterseite sowie die Darstellungskanäle auf der Darstellungsseite sind in der Regel multimodal, beispielsweise auf visueller, auditiver oder haptischer und kinästhetischer Ebene. Die **Imagination** wird durch das Erzeugen von Präsenz des Nutzers im System erzeugt. Der Grad der Präsenz ist dabei auch abhängig vom Willen des Nutzers, sich in die virtuelle Umgebung hineinzudenken und zu fühlen. Die Glaubwürdigkeit der virtuellen Umgebung ist

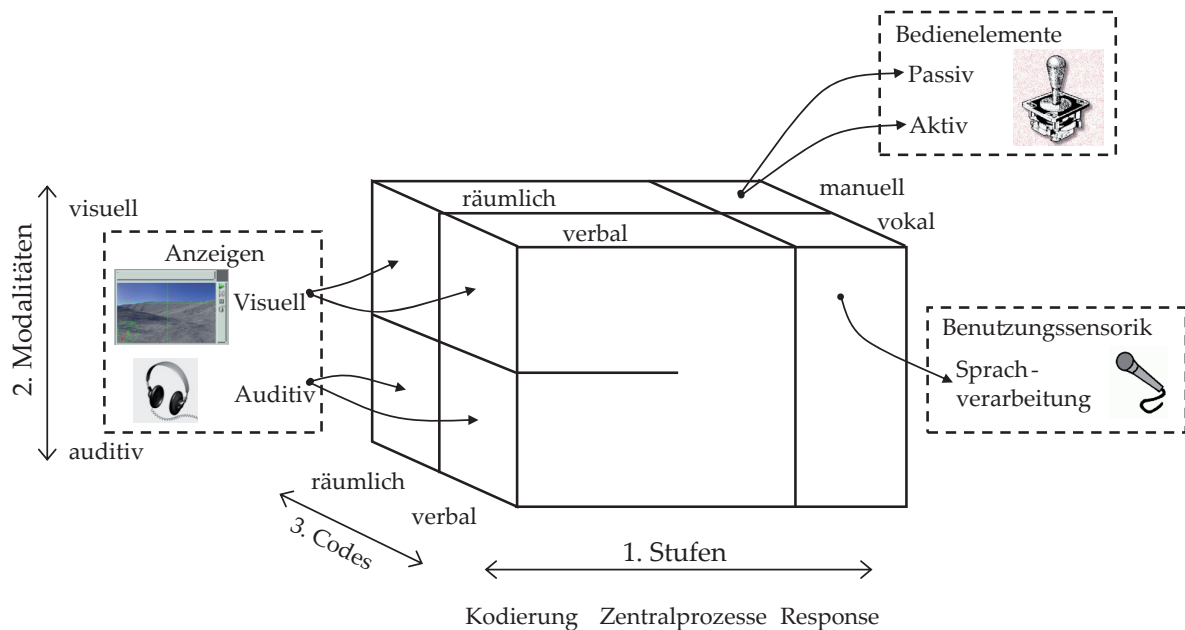


Abbildung 2.2: Multiple Ressourcentheorie nach Hollands und Wickens (1999) aus Mertens (2019)

ebenso entscheidend wie eine erwartungskonforme Eingabe in das virtuelle System. Beides trägt zur Glaubwürdigkeit der virtuellen Welt bei und erleichtern die Imagination bei dem Betrachter. Die **Interaktion** ermöglicht dem Betrachter die virtuelle Welt zu verändern und mit ihr in Kontakt zu treten. Dem Betrachter soll ermöglicht werden, die künstliche Welt zu manipulieren und zu explorieren und dabei den sich und andere Dinge bewegen können. Diese manipulatorischen Tätigkeiten sollen möglichst intuitiv durchgeführt werden können und den Betrachter zu einem aktiven Bestandteil der virtuellen Umgebung werden lassen. Im folgenden Abschnitt wird kurz auf die Grundlagen der menschlichen Informationsverarbeitung und deren biologische Grundlagen eingegangen.

2.2 Menschliche Informationsverarbeitung

Die menschliche Informationsverarbeitung wird nach dem Modell von Wickens zur multiplen Ressourcentheorie (Hollands & Wickens, 1999) in drei einfache Dimensionen eingeteilt. Dies sind die Stufen der Verarbeitung, sensorische Modalitäten und die sogenannten Verarbeitungs-codes (vgl. Abbildung 2.2). Nach Hollands und Wickens (1999) ist mit dieser Mehrdimensionalität der Ressourcen eine mehrdimensionale

Struktur der mentalen Beanspruchung an sich verbunden (Schlick, Luczak & Bruder, 2010). Nach Schlick et al. (2010) kann diese Mehrdimensionalität als Leitfaden beim Entwurf von Arbeitssystemen eingesetzt werden. Es ist nach Schlick et al. (2010) jedoch zu berücksichtigen, dass Aufgaben häufig mehr oder auch andere Dimensionen haben, beispielsweise „Timing“-Anforderungen wenn ein Rhythmus eingehalten werden muss, während eine Konversation geführt werden muss. Es darf nicht davon ausgegangen werden, dass trotz der Teilung von Ressourcen nach Hollands und Wickens (1999) ein perfektes Belegen jeder Zelle im dargestellten Würfel des multiplen Ressourcenmodells gleichzeitig möglich ist. Dennoch lässt sich das multiple Ressourcenmodell auf die Informationsverarbeitung bei Überwachungsaufgaben gut anwenden, da die dazu notwendigen Wahrnehmungsmodalitäten, visuell räumlich und die notwendigen Kodierungen, verbal und räumlich im Modell von Hollands und Wickens (1999) voneinander getrennt sind, aber für eine Überwachungsaufgabe gleichzeitig belegt werden. Nach Schlick et al. (2010) führte die Fragestellung, über wie viele Ressourcen das menschliche Gehirn verfügt oder etwa wie stark Interdependenzen zwischen den einzelnen Ressourcen sind, eher zu einer inflationären Differenzierung von immer neuen Ressourcen, statt zur Beantwortung dieser Fragestellung.

2.2.1 Visuelle Wahrnehmung

Das menschliche Auge als Teil des visuellen Apparates und chemo-optischer Sensor gilt als das komplexeste und am weitesten entwickelte Wahrnehmungsorgan (Becker-Carus & Herbring, 1997) und ist der Wahrnehmungskanal des Menschen, über den die meiste Information aufgenommen wird (Kokjer, 1987). Das über die Pupille einfallende Licht wird über die Linse gebündelt und fokussiert, und trifft auf die Netzhaut oder Retina, auf der ein umgekehrtes Abbild der Umgebung erzeugt wird. Ein Querschnitt des menschlichen Auges ist in Abbildung 2.3 dargestellt.

Als sichtbares Licht wird ein bestimmtes Spektrum elektromagnetischer Strahlung bezeichnet, für das die Retina empfindlich ist. Dieses Spektrum liegt zwischen einer Wellenlänge von circa 400 bis 720 Nanometern. Licht setzt sich aus diesen verschiedenen Wellenlängen zusammen und bildet durch seine Zusammensetzung die für den Menschen wahrnehmbaren verschiedenen Farben (vgl. Abbildung 2.4). Die Retina

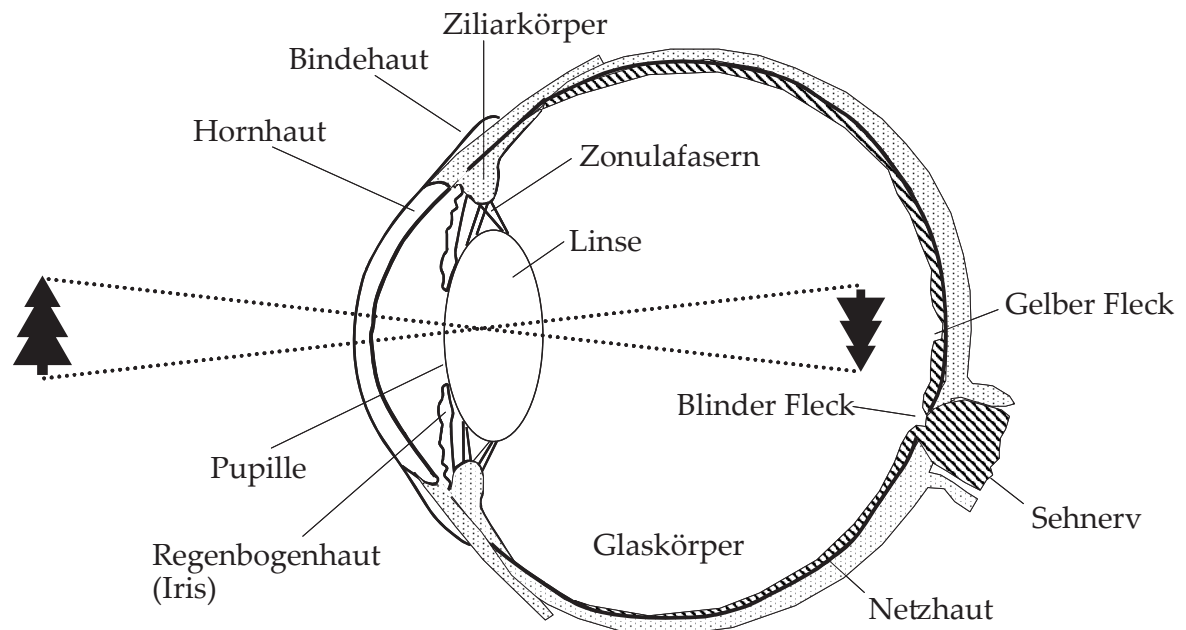


Abbildung 2.3: Querschnitt des menschlichen Auges (Schlick, Luczak & Bruder, 2010)

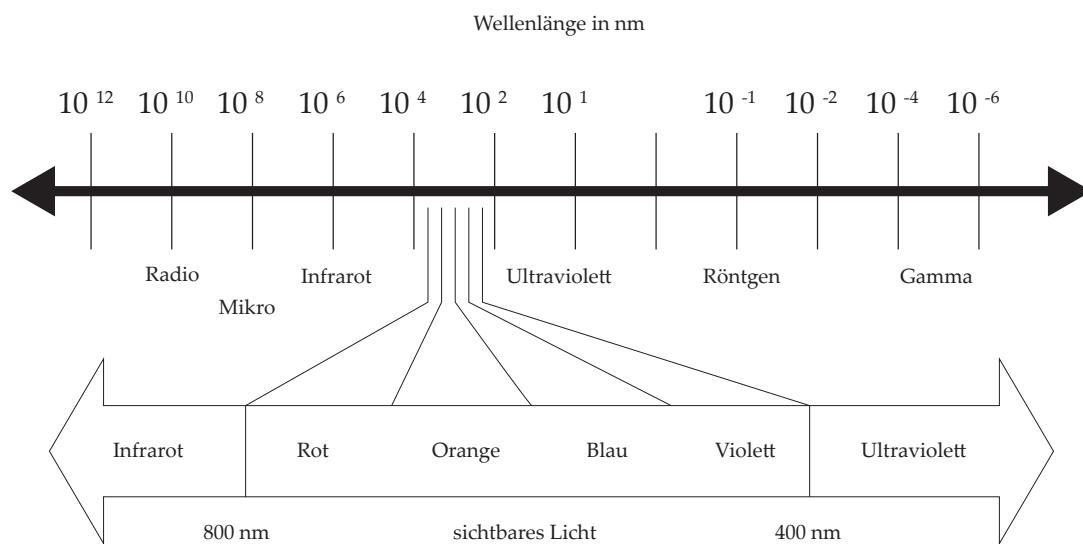


Abbildung 2.4: Spektrum der elektromagnetischen Strahlung nach Zeppenfeld und Wolters (2004)

besteht aus zwei unterschiedlichen Zelltypen, die sogenannten Stäbchen sind Helligkeitsintensitätsempfindlich, während die sogenannten Zapfen farbeempfindlich sind. Genau gegenüber der Linse befindet sich die Fovea Centralis, ein Bereich der Retina, der nur aus Zapfen besteht und das schärfste Farbsehen ermöglicht. Die übrige Beschaffenheit der Retina besteht dominierend aus den für das Helligkeitsempfinden verantwortlichen Stäbchen, so dass in der peripheren Sicht Farben zwar schlechter wahrgenommen werden, Helligkeitsunterschiede dafür sehr gut. Durch Veränderungen der Lichtintensität der Umgebung verändert die Pupille ihren Adaptionszustand und damit den Lichteinfall in das menschliche Auge. Das hell-adaptierte Auge besitzt eine hohe Empfindlichkeit für den Farbbereich von Grün bis Gelb. Ist das Auge dunkeladaptiert, besitzt es eine hohe Empfindlichkeit für den Farbbereich blau bis grün und ist für den Farbbereich von grün bis gelb unempfindlicher. Durch Kon- bzw. Distraction des Ziliarkörpers wird die Brechkraft der Linse verändert, um die erzeugte Abbildung möglichst scharf darzustellen. Über diesen als Akkommodation bezeichneten Prozess lässt sich die Bildebene der abzubildenden Umgebung so verschieben, dass sie auf der Retina liegt und dadurch eine scharfe Abbildung erzeugt wird (Becker-Carus & Herbring, 1997) (vgl. Abbildung 2.6). Kann die Linse bei Entspannung nicht flach genug werden um weit entfernte Objekte auf der Retina scharf abzubilden, spricht man von Kurzsichtigkeit oder Myopie. Kann die Linse nicht ausreichend gekrümmt werden führt dies zu einer Weitsichtigkeit, oder Hyperopie. Die Bildebene liegt dann entsprechend hinter oder vor der Retina. Durch Sehhilfen lässt sich die Bildebene zurück auf die Retina nach vorne oder hinten verschieben wodurch die Akkommodation trotz der Einschränkung wieder möglich wird. Das von der Umgebung reflektierte und auf die Retina einfallende Licht wird nun in elektrische Impulse transduziert und von beiden Augen über den Sehnerv in das Sehzentrum des Gehirns weiter geleitet. Hier werden die jeweiligen, umgekehrten Signale zu einem stereoskopischen Bild zusammengesetzt und korrekt ausgerichtet. Damit die wahrgenommenen Bilder beider Augen übereinander gelegt werden können ist die Ausrichtung des Seh winkels beider Augen notwendig. Über Muskulatur werden die Sichtachsen beider Augen so gesteuert, dass ein in der Fixationsentfernung liegendes Objekt korrespondierend auf der jeweiligen Netzhaut abgebildet werden. Liegt dieses Objekt sehr weit in der Ferne, so sind beide Sehachsen annähernd parallel und man spricht von Divergenz. Wird ein nahes Objekt fixiert, bewegen sich beide Augachsen zueinander, damit eine Deckung beider Bilder entsteht und man spricht

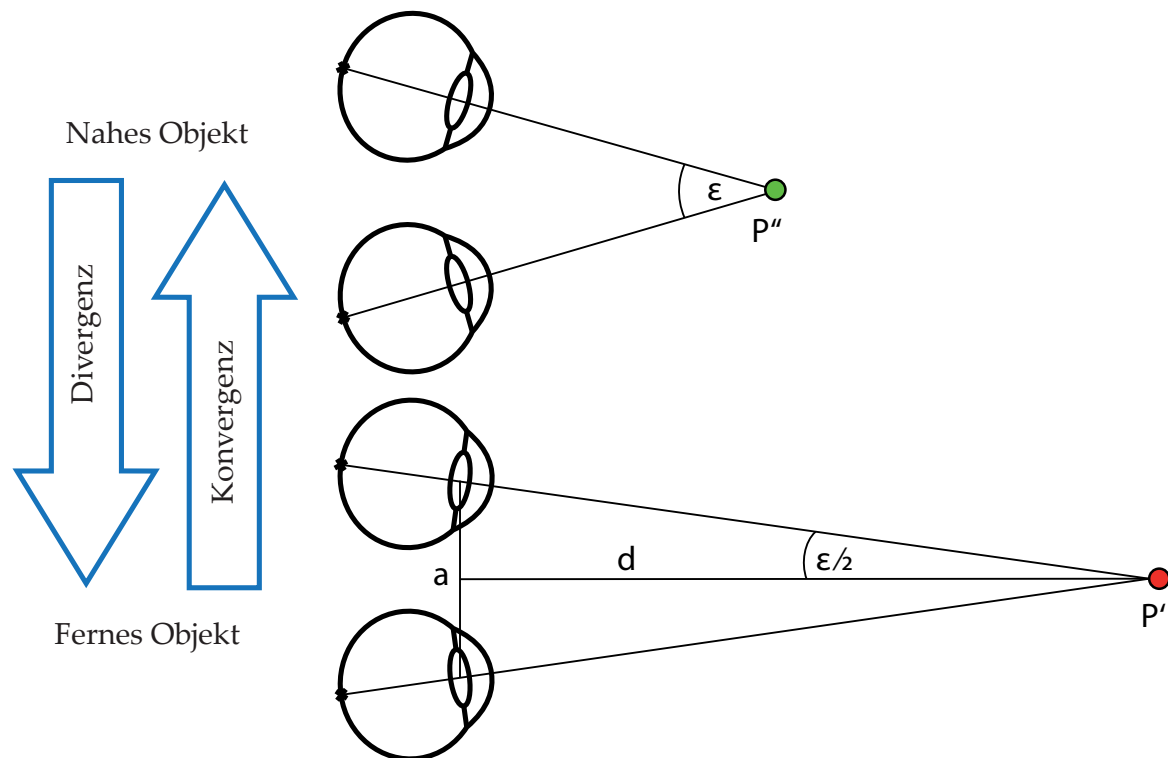


Abbildung 2.5: Vergenzwinkel ϵ bei Betrachtung des Punktes P (aus Mertens, 2019)

von Konvergenz. Die Stellung des Augenpaares für die Konvergenz sowie Divergenz sind in Abbildung 2.5 modellhaft dargestellt.

Bei bekanntem Konvergenzwinkel ϵ sowie bekanntem Augenabstand a kann über die folgende Berechnung der Abstand des Betrachters d zum Schätzobjekt P bestimmt werden:

$$\tan \frac{\epsilon}{2} = \frac{a}{2} \times \frac{1}{d} \quad (2.1)$$

Diese Schätzung ist einer von mehreren Tiefenhinweisen, die das stereoskopische Sehen ermöglichen. Im Folgenden werden diese genauer beschrieben.

2.2.2 Tiefenhinweise

Die Tiefenwahrnehmung des Menschen wird durch eine Reihe verschiedener Faktoren bestimmt, die als sogenannte Tiefenhinweise bezeichnet werden. Diese Tiefenhinweise lassen sich nach Becker-Carus und Herbring (1997) in monokulare und binokulare Tiefenhinweise unterteilen. Eine Klassifizierung von Tiefenhinweisen wurde von

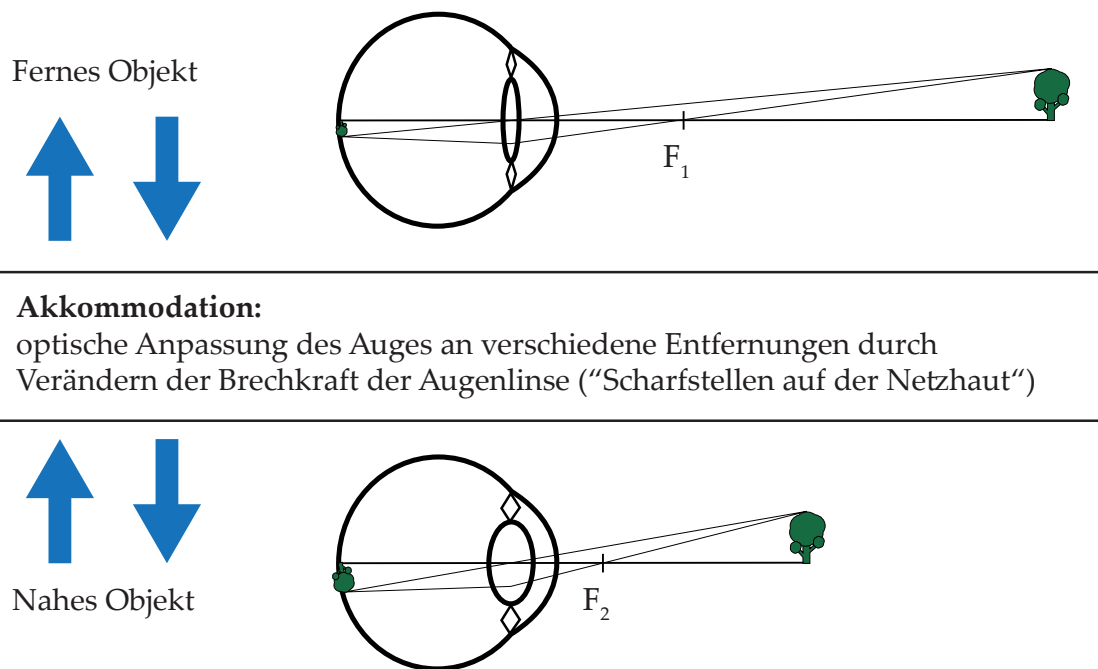


Abbildung 2.6: Umgekehrte Abbildung eines betrachteten Objektes auf der Retina und Darstellung der Kontraktion des Ziliarmuskels bei unterschiedlichen Gegenstandsweiten (aus Mertens (2019))

Reichelt, Häussler, Fütterer und Leister (2010) vorgenommen und ist in Abbildung 2.7 dargestellt. Obwohl Informationsaustausch in der heutigen Gesellschaft zum größten Teil auf der visuellen Ebene stattfindet, so ist der Einsatz von dreidimensionalen Anzeigetechniken verhältnismäßig selten. Eine natürliche Wahrnehmung künstlicher Tiefenhinweise, wie sie im täglichen Leben stattfindet, kann mit Anzeigetechnologien noch nicht vollständig abgebildet werden und ist schwierig umzusetzen, was sowohl für die Umsetzung der Anzeigetechnologien als auch die Erstellung der entsprechenden Inhalte für die Darstellung gilt (Reichelt et al., 2010). Im folgenden werden Tiefenhinweise genauer beschrieben und auf ihre Umsetzbarkeit in virtuellen Systemen eingegangen.

Monokulare Tiefenhinweise

Trotzdem die Fähigkeit des räumlichen Sehens durch beidäugiges Sehen begründet ist, sind Tiefenhinweise auch über monokulare Sicht als Information extrahierbar. Damit kann auch bei zweidimensionalen Darstellungen ein Eindruck von Tiefe erzeugt werden. Die wichtigsten monokularen Tiefenhinweise nach Becker-Carus und Herbring (1997) sind im folgenden beschrieben. Monokulare Tiefenhinweise können in virtuellen Darstellungen leicht nachgebildet werden und entstehen bereits über die Projektion dreidimensionaler Inhalte auf eine zweidimensionale Ebene.

Lineare Perspektive Zu einem Fluchtpunkt parallel verlaufende Linien konvergieren am Horizont und erzeugen so den Eindruck von räumlicher Tiefe.

Relative Größe im Blickfeld Sofern sich im Sichtfeld gleichartige Objekte befinden, werden kleiner abgebildete Objekte als weiter entfernt interpretiert.

Verdeckung (Interposition, Superposition) Wenn sich zwei gleichartige Objekte im Sichtfeld befinden und ein Objekt durch das andere verdeckt wird, wird das verdeckte Objekt als weiter entfernt interpretiert, auch dann, wenn die Objekte in gleicher Entfernung liegen.

Relative Höhe im Blickfeld Sind zwei gleichgroße Objekte im Sichtfeld unterschiedlich hoch (unterhalb der Horizontlinie) positioniert, erscheint das niedrigere Objekt näher.

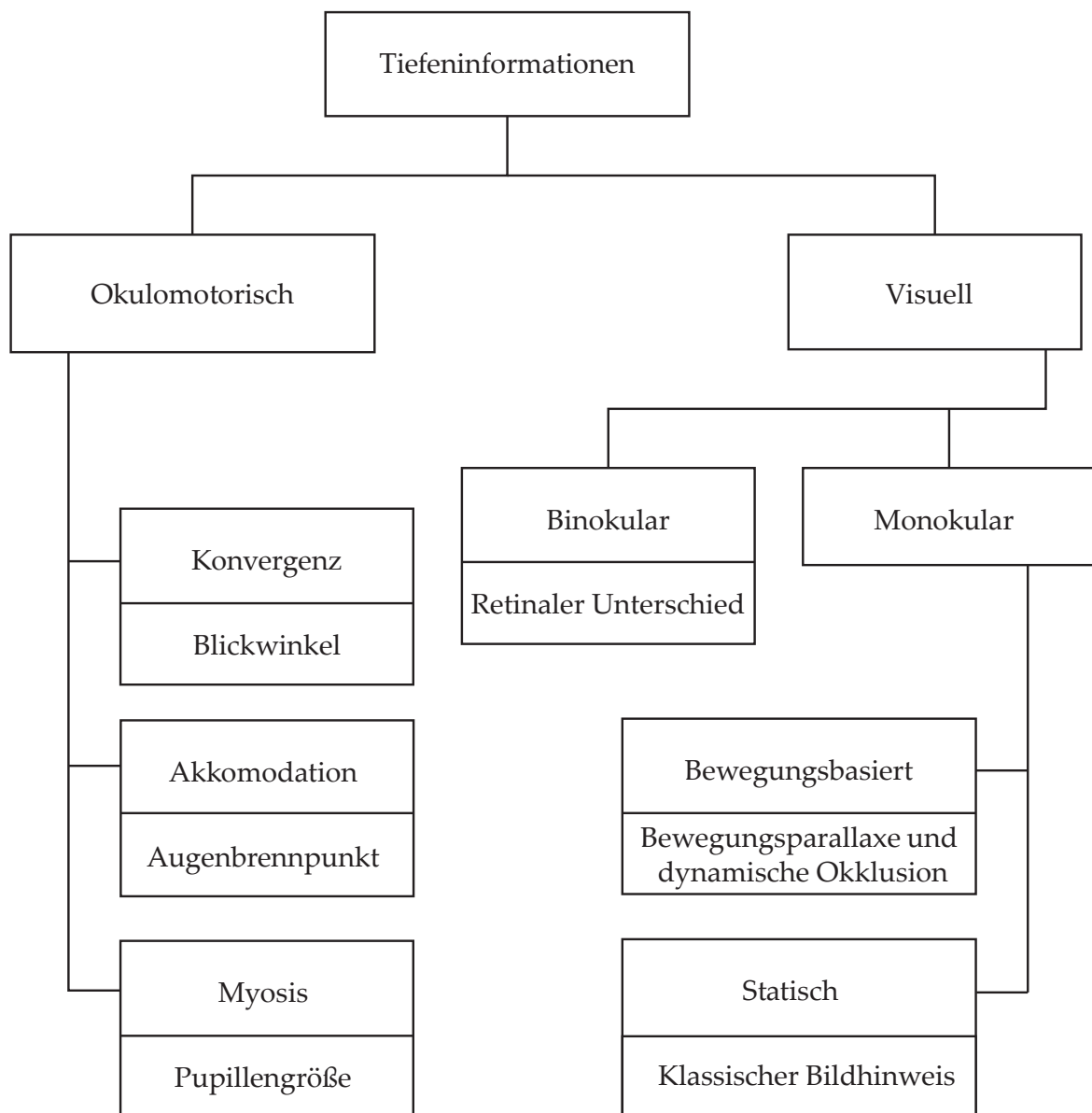


Abbildung 2.7: Aufteilung der Tiefenhinweise nach Bowman (2005)

Texturgradient Hinweise auf die Raumentiefe können Untergrundelemente, wie z.B. Straßenpflasterung oder Wellengang, liefern, die mit zunehmendem Abstand immer dichter gepackt sind und eine immer feiner werdende Struktur aufweisen.

Gewohnte Größe von Gegenständen Die Größe von Gegenständen kann im Gedächtnis gespeichert werden. Das gespeicherte Abbild kann sich nicht nur auf die Wahrnehmung von Größe und Tiefe auswirken, sondern auch eine erinnerte Entfernung signalisieren.

Bewegungsparallaxe Als Bewegungsparallaxe wird die unterschiedlich schnelle und weite gegenseitige Verschiebung entfernter und naher Objekte bezeichnet, die auf die Retina projiziert werden.

Fortschreitendes Zu- oder Aufdecken Wird ein weiter vorne gelegener Gegenstand von einem weiter entfernt liegenden überholt, wird er zunächst zunehmend verdeckt und dann zunehmend aufgedeckt. Dieser Effekt ergibt sich aus der Bewegungsparallaxe.

Binokulare Tiefenhinweise

Beim beidäugigen Sehen werden binokulare Tiefenhinweise zur Errechnung der Tiefenwahrnehmung verwendet (Becker-Carus & Herbring, 1997, S. 123 ff.). Es kann derzeit nur ein Teil der vorhandenen binokularen Tiefenhinweise künstlich nachgebildet werden, was unter anderem Reizwidersprüche hervorrufen kann.

Konvergenz und Akkommodation Konvergenz beschreibt das Einwärtsdrehen der Augen (Konvergenz der Augenachsen), um das Abbild eines zu betrachtenden Gegenstandes bei beiden Augen auf der Fovea centralis zu zentrieren. Akkommodation beschreibt das Verdicken der Augenlinse, um einen nah gelegenen Gegenstand auf der Retina scharf einzustellen. Beide Phänomene können als okulomotorische Tiefenhinweise zusammengefasst werden und sind nur bei Distanzen bis maximal drei Metern wirksam.

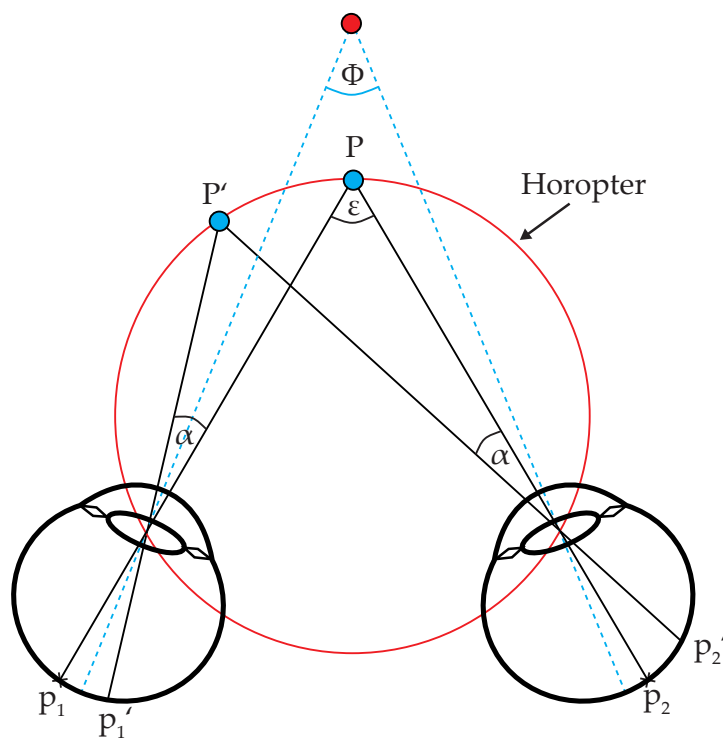


Abbildung 2.8: Darstellung des Horopters, auf dem die Fixationspunkte für die Tiefenwahrnehmung liegen (vgl. Schlick (2016) und Helmholtz (1864)).

Querdisparation Die unterschiedlichen Positionen der Augen erlauben zwei verschiedene Blickwinkel auf ein Objekt. Diese zwei voneinander abweichende Abbildungen auf der Netzhaut werden normalerweise über das nachgeschaltete Nervennetz zusammengefasst, bevor eine räumliche Wahrnehmung im Bewusstsein projiziert wird. Diese Abweichung der beiden Retina-Bilder entsteht dadurch, dass das Bild eines direkt fixierten Objekts in beiden Augen auf die gleichen Punkte innerhalb der jeweiligen Fovea fällt. Dadurch entstehen korrespondierende Netzhautpunkte. Liegen auf dem Horopter (einem durch den Fixationspunkt gehenden, imaginären Kreisbogen) weitere Objekte in gleicher Entfernung, werfen auch deren Abbilder auf korrespondierende Netzhautpunkte (vgl. Abbildung 2.8). Liegen Objekte dagegen näher oder weiter weg, werfen diese korrespondierende Abbilder auf disparate, nicht korrespondierende Netzhautpunkte. Während kleinere Disparitäten durch das neuronale visuelle System zu einer räumlichen Wahrnehmung verbunden werden können, führen größere Disparitäten zu zwei einzelnen Bildern. Diese werden vom visuellen System auf ihre horizontale Verschiebung (Querdisparation) hin untersucht und zu einem plastisch-räumlichen Bild zusammengefasst. Dabei kann die Querdisparation als Tiefe in der Dreidimensionalität interpretiert werden, da sie proportional mit der Entfernung vom Horopter wächst (vgl. dazu Schlick (2016) und Helmholtz (1864)).

Eine dreidimensionale Wahrnehmung der realen Welt lässt sich auch künstlich durch querdisparate Bilder des gleichen Gegenstands erzeugen, wie sie z.B. bei 3D-Bildern oder -Filmen genutzt wird. Das Stereoskop von Wheatstone und Holmes ermöglicht die gleichzeitige Darbietung zweier disparater Bilder und ermöglichten so die künstliche Erzeugung einer Tiefenwahrnehmung eines statischen Bildes. Die Querdisparation bildet die laterale Positionsdivergenz der beiden Netzhautabbildungen ab. Mit ihr kann eine relative Entfernungsschätzung der fixierten Gegenstände vorgenommen werden und damit auch Beziehungen hergeleitet werden, beispielsweise ob sich ein Objekt „vor“, „hinter“ oder zwischen zwei Gegenständen befindet. Die vertikale Disparation hat für das räumliche Sehen dagegen keine Bedeutung (Schlick et al., 2010). Um eine quantitative Aussage über die Entfernungsdifferenz zweier Sehobjekte treffen zu können, reicht die Auswertung der Querdisparation eines einzelnen Auges nicht aus. Stattdessen ist ein Vergleich der Querdisparation beider Augen notwendig. Da die Differenz nicht direkt gemessen werden kann, wird eine Hilfskonstruktion nach Helmholtz verwendet, die auch verwendet wird, um die stereoskopische Parallaxe zu beschreiben, welche schematisch in Abbildung 2.9

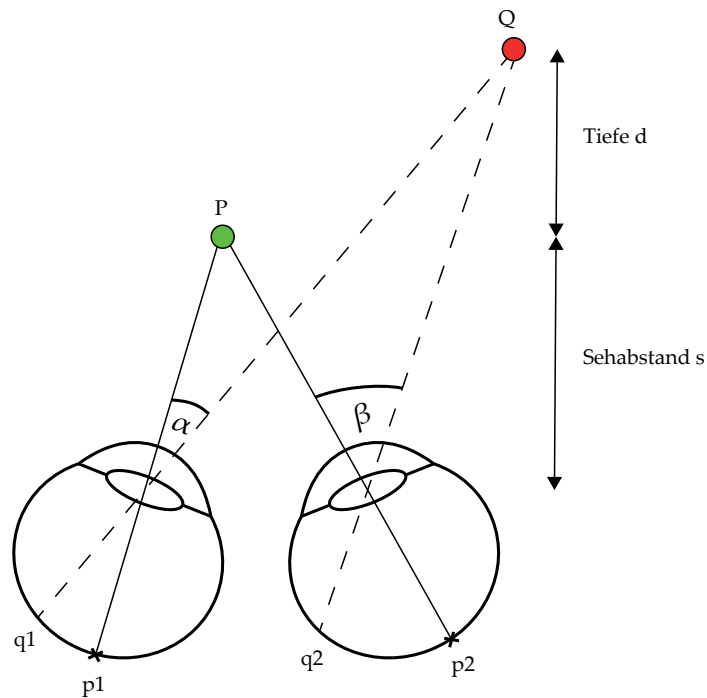


Abbildung 2.9: Stereoskopische Parallaxe (aus Mertens (2019))

dargestellt ist und durch Formel 2.2 beschrieben wird.

$$p = a - \frac{a \cdot b}{e} \quad (2.2)$$

Um für Darstellungen in der erweiterten und virtuellen Realität räumliches Sehen zu simulieren, können neben monokularen Tiefenhinweisen auch die Konvergenz als Tiefenhinweis simuliert werden, indem dem menschlichen Sehapparat querdisparate Bilder dargeboten werden. Hierbei werden dem linken und rechten Auge jeweils ein um die stereoskopische Parallaxe verschobenes Bild einer Szene dargeboten (Schlick et al., 2010). Dieser künstlich erzeugte Tiefenhinweis ist auf die Konvergenz beschränkt. Fällt bei der Betrachtung eines künstlichen 3D-Bildes, beispielsweise von einem stereoskopischen Display, der Tiefenhinweis der Akkommodation weg, wird das stereoskopische Bild also nur über die Querdispersion und den Konvergenzwinkel erzeugt. So entsteht ein Konflikt zwischen Akkommodation und Vergenz 2.11. Dieses Phänomen kann zu Unwohlsein und Symptomen der Simulatorkrankheit führen (Kennedy, Lane, Berbaum & Lilienthal, 1993). Heutige 3D-Brillen funktionieren nach dem gleichen Prinzip, indem beiden Augen nur jeweils eines der beiden gleichzeitig

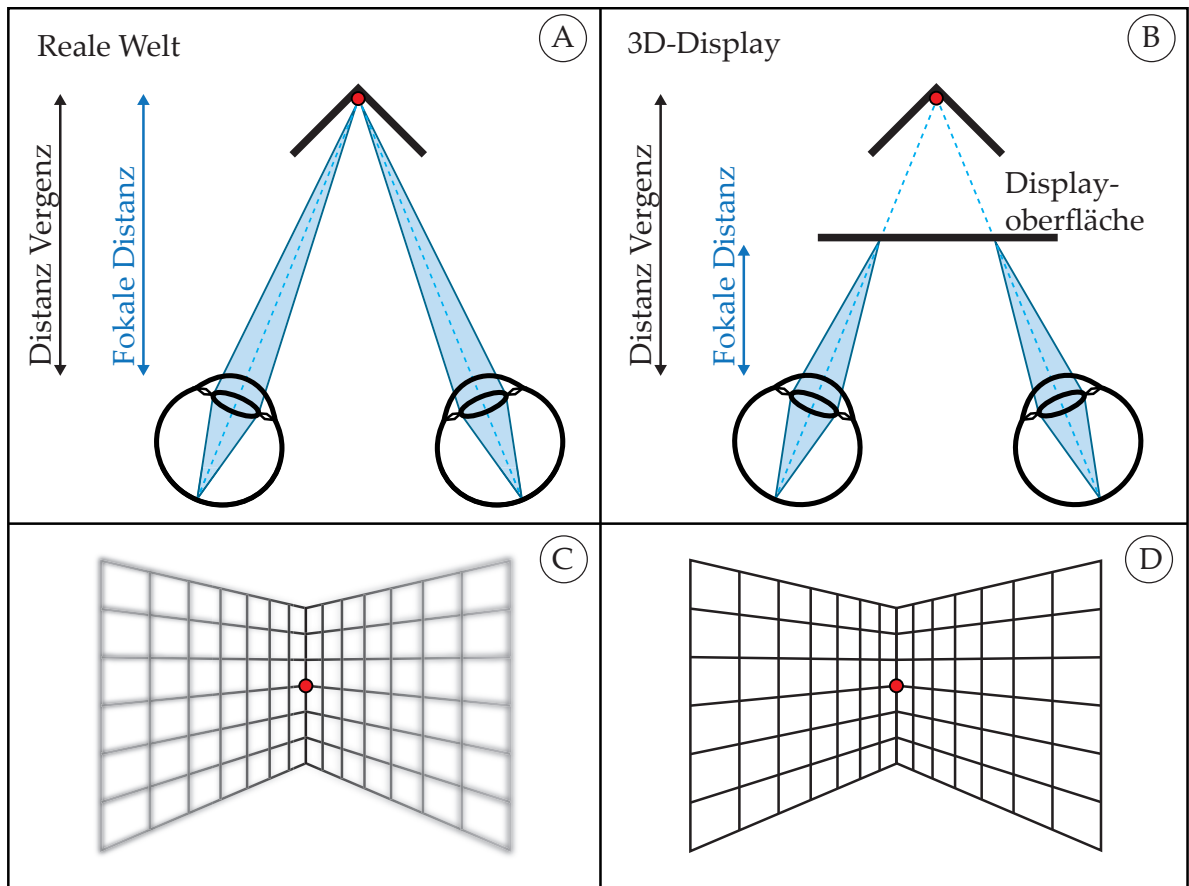


Abbildung 2.10: Illustration Konflikt zwischen Akkommodation und Vergenz nach Hoffman, Girshick, Akeley und Banks (2008) (angepasste Darstellung)

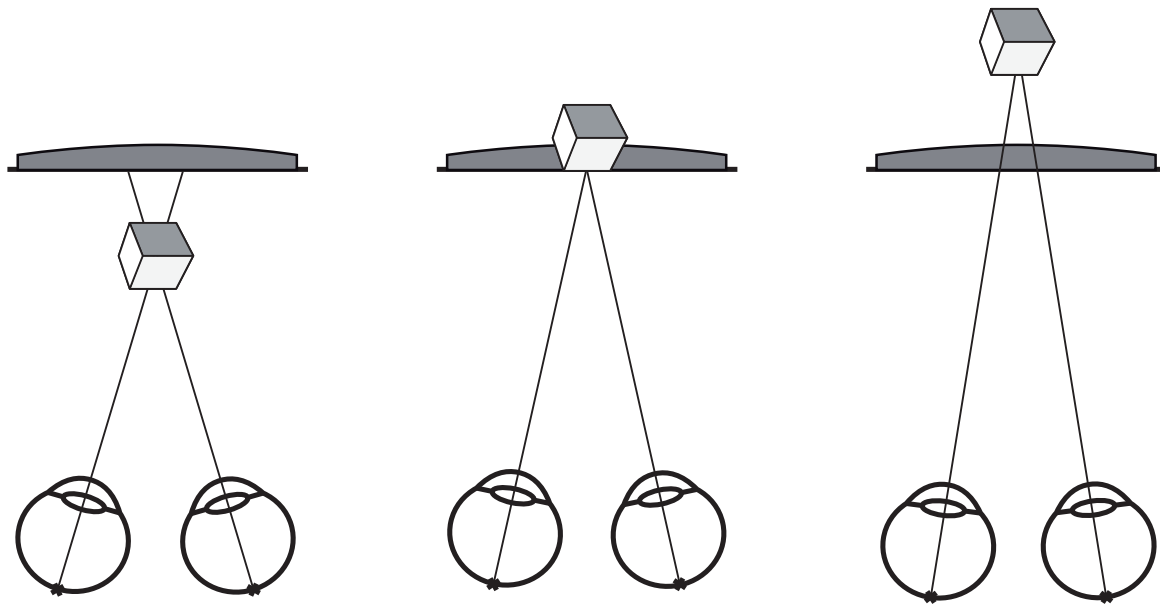


Abbildung 2.11: Konvergenzwinkel der Augen bei negativer Parallaxe (links), null-Parallaxe (Mitte) und positiver Parallaxe (rechts).

vorhandenen Bilder getrennt dargeboten wird. Für diese Art des räumlichen Sehens wird der von Charles Wheatstone geprägte Begriff des stereoskopischen Sehens bzw. Stereopsis verwendet (Wade, 2002). Mit den derzeit auf dem Verbrauchermarkt erhältlichen Technologien sind jedoch nicht alle Tiefenhinweise reproduzierbar (Mehrabi, Peek, Wuensche & Lutteroth, 2013; Reichelt et al., 2010), die technologischen Umsetzungen von räumlichen Ausgabemedien hat sich in den letzten Jahren jedoch zunehmend verbessert. Visuelle Ausgabesysteme sind mittlerweile durch fallende Preise und geringere Produktionskosten im Endverbrauchermarkt verfügbar. Mittlerweile existieren eine Vielzahl an visuellen Ausgabesystemen, die jeweils technische Voraussetzungen für spezialisierte Szenarien erfüllen. In Kapitel 2.5 wird kurz auf stereoskopische Anzeigesysteme eingegangen.

2.2.3 Situational Awareness in Lagedarstellungen

Maritime Geoinformationssysteme oder maritime Lagedarstellungen sind für die Überwachung des Schiffsverkehrs ein wichtiges Werkzeug für die Früherkennung von Gefahren. Sie gewähren dem Betrachter in komplexen Situationen einen effektiven Überblick über die aktuelle Situation. Die „Situational Awareness“ oder zu Deutsch,

das „Situationsbewusstsein“, beschreibt das kognitive Modell eines Betrachters, das er von seiner Umwelt zu einer beliebigen Zeit aufgebaut hat und sich aus seinen Beobachtungen ableitet (Endsley, 1988a) (Endsley, 1988b). Das Situationsbewusstsein zählt zu den entscheidenden Fähigkeiten eines Betrachters, die maßgeblich zum Erfolg bei der Benutzung eines Systems beitragen. Die Grundaufgabe des Betrachters besteht in den meisten Missionen durch Beobachtung der aktuellen Situation und der Erkennung von Gefahren. Durch Einbettung und Fusion verschiedener Datensätze soll dem Betrachter eine schnelle Bewertung der Situation auf Basis der zur Verfügung gestellten Daten ermöglicht werden und bei einer notwendigen Entscheidung unterstützen. Für das Treffen wichtiger Entscheidungen ist der Erhalt der Übersicht und die Abstraktion von Information essentiell. Die Integration abstrakter Darstellung von Information kann auch in dreidimensionalen Darstellungen über bereits entwickelte Symbolik erfolgen, wie sie durch den militärischen Standard MIL-SYM-2525 bereitgestellt wird. Über diese Symbolik ist grundsätzlich beinahe jedes Land-, Wasser- und Luftfahrzeug standardisiert abbildbar. Die derzeitig verwendete Symbolbibliothek unterliegt einer zweidimensionalen Darstellung und kann verwendet werden, um Fahrzeugverkehr in einer dreidimensionalen Lagedarstellung zu zeigen. Forschungen von Thomas und Wickens (1999) konnten auch zeigen, dass die Immersion in eine abstrakt dargestellten Ansicht bei militärischen Lagedarstellungen nicht immer von Vorteil sein muss. Dazu wurden in einer Experimentalstudie Kommandeuren in einer virtuellen Kampfsituation eine exozentrische und eine egozentrische Ansicht dargeboten und eine Überwachungsaufgabe erfüllen. Dazu gehörte die mündliche Berichterstattung über neue gegnerische Kontakte oder der Änderung an bestehenden eigenen Einheiten. Die Ergebnisse der erhobenen Daten ergaben, dass Offiziere, bei denen eine stärkere Immersion durch die egozentrische Sichtweise erzeugt wurde, weniger genaue Zustandsberichte abgegeben wurden, als von Offizieren, die das exozentrisches 3D-Display betrachteten. Dieser Effekt ist auf die notwendige Veränderung der Sicht zurückzuführen, welche bei einer egozentrischen, immersiven Sichtweise durchgeführt werden muss, während Offiziere mit einer exozentrischen Sicht das gesamte Lagebild dargeboten bekamen.

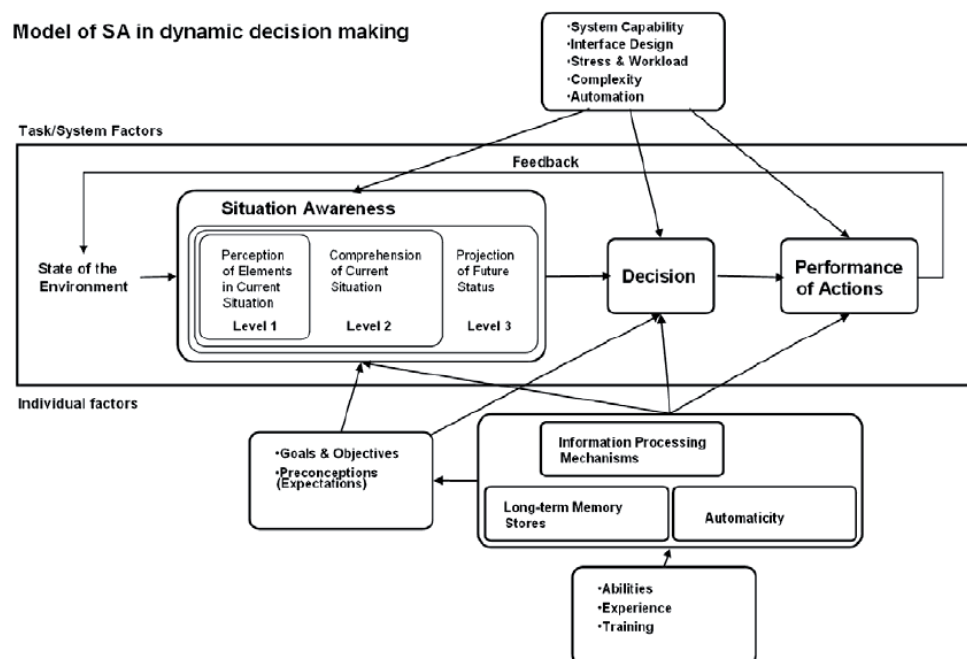


Abbildung 2.12: Modellhafte Darstellung des Situationsbewusstseins nach Endsley (1995)

2.2.4 Das Fitts'sche Gesetz

Das Fitts'sche Gesetz wurde von Paul Fitts erstmals im Jahre 1954 zur Erfassung der Kanalkapazität des menschlichen motorischen Systems beschrieben (Fitts, 1954). Die dazu von Paul Fitts formulierte mathematische Gleichung basiert auf der von Claude Shannon definierten Informationstheorie (Shannon, 1949), wonach physikalische Kommunikation grundsätzlich eine begrenzte Bandbreite W und Signalstärke S besitzt und dem Signal eine Störquelle N hinzu geordnet wird. Shannon formulierte dazu die Gleichung für die Kapazität des Kommunikationskanals C in bits pro Sekunde, die später von Paul Fitts als Grundlage für die mathematische Gleichung zur Beschreibung der Kanalkapazität des menschlichen motorischen Systems verwendet wurde.

$$C = W \log_2 \frac{S + N}{N} \quad (2.3)$$

Fitts leitete seine Theorie der begrenzten motorischen Bandbreite des menschlichen motorischen Systems ab, indem er schlussfolgerte, dass die durchschnittliche Amplitude A einer menschlichen Bewegung äquivalent zum Durchschnitt aus der Addition

aus Signal und Rauschen wie in der von Shannon verwendeten Gleichung sei. Die halbe Reichweite der Bewegungsvariabilität ist nach Fitts' Annahme äquivalent zu der von Shannon gesetzten maximalen Störamplitude. Aus dieser Annahme leitete Fitts den sogenannten Schwierigkeitsindex ID (engl. Index of Difficulty) ab, den er in der zur Formulierung von Shannon ähnlichen Formel beschreibt (Fitts & Peterson, 1964).

$$ID = \log_2\left[\frac{2A}{W}\right] \quad (2.4)$$

Diesen Schwierigkeitsindex erweiterte Paul Fitts um experimentell erhobene Daten aus einem Versuch, in dem Versuchsteilnehmer dazu aufgefordert waren, eine Zeigeaufgabe reziprok auszuführen, bei der zwei Zielplatten mit einem Griffel abwechselnd möglichst schnell getroffen werden mussten (siehe Abbildung 2.13). Im Versuch wurden die Breite der Zielobjekte W , gemessen in Millimetern sowie die Amplitude A , also der Abstand, ebenfalls gemessen in Millimetern, zwischen den beiden Zielobjekten, variiert. Für die Bestimmung des Abstandes wird jeweils genau vom Mittelpunkt der Zielobjekte ausgegangen. Die Bewegungszeit, die benötigt wurde um den Griffel von Zielobjekt zu Zielobjekt zu bewegen, wurde als abhängige Variable gemessen. Mit den experimentell erhobenen Daten erweiterte Fitts nun das auf Shannon basierende mathematische Modell für die Bestimmung der Bewegungszeit MT .

$$MT = a + b \log_2\left[\frac{2A}{W}\right] \quad (2.5)$$

Die Konstanten a und b ermittelte Fitts über eine lineare Regression der Bewegungszeit und des Schwierigkeitsindex (Index of Difficulty). Die Konstante a entspricht dem Ordinatenabschnitt in einem kartesischen Koordinatensystem und wird in der Einheit Millisekunden gemessen, Konstante b bestimmt die Steigung der berechneten Regressionsgeraden und gibt den zur Informationsverarbeitung erforderlichen Zeitbedarf in Millisekunden pro bits an. Der Kehrwert der Konstante b beschreibt die Kanalkapazität des motorischen Systems in bits pro Millisekunde (Vetter, 2012).

Die Anwendung des Fitts'schen Gesetzes im Bereich der Mensch-Computer-Interaktion und speziell zur Bewertung unterschiedlicher Zeigegeräte wurde erstmals von Card, English und Burr (1978) durchgeführt. Verglichen wurden unterschiedliche Eingabemethoden zur Selektion einer Textpassage, unter anderem mit einem Joystick

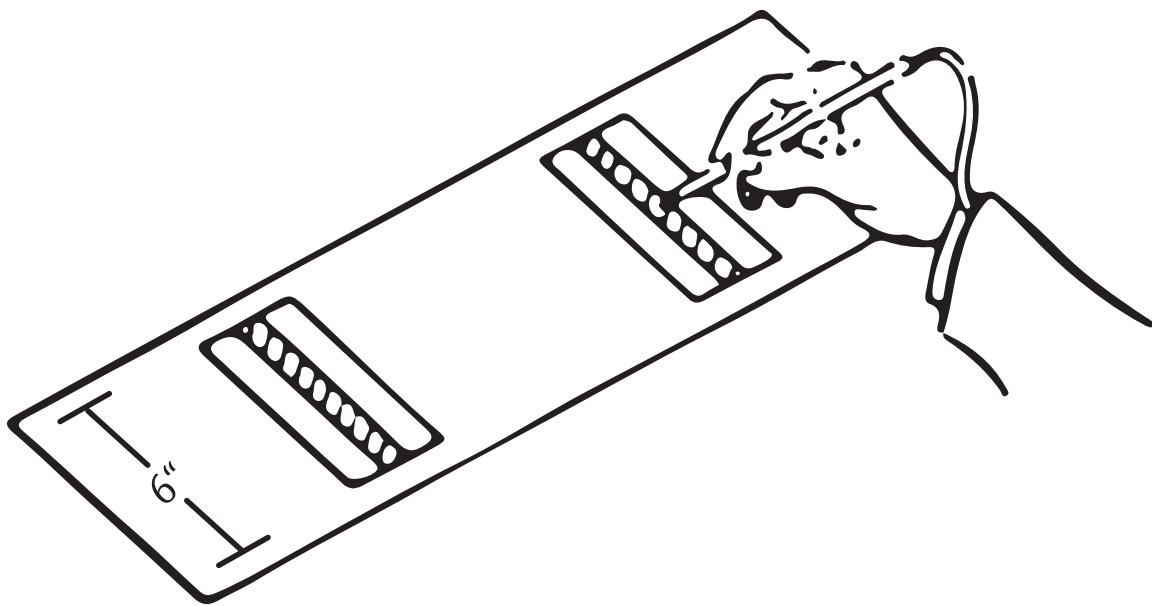


Abbildung 2.13: Aufbau der reziproken Zeigaufgabe nach Fitts (1954)

und einer Computermouse. Card et al. (1978) verwendeten dazu eine von Welford angepasste Version des Fitts'schen Gesetzes. In der von Welford vorgeschlagenen Variante 2.6 wurde die Anpassungsgüte des Modells durch experimentell gemessene Daten erhöht.

$$MT = a + b \log_2 \left[\frac{A}{W} + 0,5 \right] \quad (2.6)$$

Die am häufigsten im Kontext der Mensch-Computer-Interaktion verwendete Anpassung des Fitts'schen Gesetzes wurde von MacKenzie (1992) formuliert, die sogenannte Shannon-Formulierung (Formel 2.7), und legt die von Welford (1968) angepasste Variante zugrunde. Durch die Anpassung der Formulierung wurde durch MacKenzie und Buxton (1992) die Maximierung der Analogie zur Informationstheorie von Shannon angestrebt Vetter (2012).

$$MT = a + b \log_2 \left[\frac{A + W}{W} \right] = a + b \log_2 \left[1 + \frac{A}{W} \right] \quad (2.7)$$

Die Formulierung zur Bestimmung des Schwierigkeitsgrades bei der Bedienung von Mensch-Computer-Schnittstellen ist in die Norm zur Auswahl und Bewertung ergonomischer Mensch-System-Schnittstellen physikalischer Eingabegeräte DIN EN ISO 9241-420 (2011) aufgenommen worden. Diese Norm umfasst im allgemeinen

Empfehlungen zur Auswahl von von Eingabegeräten für Interaktive Systeme auf der Grundlage ergonomischer Faktoren DIN EN ISO 9241-420 (2011). Im allgemeinen wird dort die Anwendung der Gestaltungsrichtlinien mit klassischen Eingabegeräten vorgeschlagen wie Tastaturen, Mäuse, Trackballs, Berührungsbildschirme und weitere. Zur Bewertung dieser Eingabegeräte wird der als I_D bezeichnete Schwierigkeitsgrad in der Shannon'schen Variante 2.7 verwendet, um das Maß für die Benutzergenauigkeit zu messen, die dem Nutzer bei einer Aufgabe mit dem entsprechenden Eingabegerät abgefordert wird. Die Shannon-Formulierung wurde für die Bewertung eindimensionaler Zeigeaufgaben bereits durch viele experimentelle Studien validiert. Insofern jedoch die Dimension der Zielobjekte variiert wird, ist in der Regel eine Anpassung oder wenigstens eine erneute Validierung anhand von Messdaten des Fitts'schen Gesetzes notwendig. Die Verwendung des Fitts'schen Gesetzes in Versuchsreihe A findet unter der Verwendung von kugelförmigen Zielen statt. Die Zielobjekte sind damit eindimensional. Für die Bewertung der in dieser Arbeit evaluierten Eingabeverfahren wird daher keine neue Evaluation vorgenommen.

2.3 Die Menschliche Hand

Die Leistung der menschlichen Hand gilt als außerordentlich. Mit ihr manipulieren und bewegen wir Gegenstände schnell, präzise und geringer bewusster Aufmerksamkeit (Bowman, 2005, S. 139 ff). Sie hat sich in der Evolution des Menschen als einzigartige Extremität über lange Zeit entwickelt und wesentlich zum Erfolg des Menschen in der Evolutionsgeschichte beigetragen. Sie ist das primäre Werkzeug zur Interaktion mit der Außenwelt und ermöglicht die Ausführung von fein- und grobmotorischen Tätigkeiten gleichermaßen. Durch sie ist es dem Menschen vorbehalten, Werkzeuge zu benutzen und auch selbst zu entwickeln. Mit der Hand kann die nähere Umgebung ertastet und manipuliert werden.

Die ältesten Hinweise auf den Gebrauch von Werkzeug reichen etwa 1,75 bis 2,5 Millionen Jahre zurück (Leakey, Tobias & Napier, 1964), (Napier, 1962) und liegen im erdgeschichtlichen Zeitalter des Pleistozäns. Sie gehen auf Knochenfunde in der tansanischen Olduvai-Schlucht zurück, die zum Namensgeber der sogenannten Oldowan-Kultur wurde. Der Fund umfasste fossile Handknochen, denen Eigenschaften zugeordnet werden können, die der Hand des heutigen Menschen sehr ähnlich

sind, insbesondere konnte von Napier (1962) nachgewiesen werden, dass der Daumen der fossilen Hand schon in einer der heutigen Form des menschlichen Daumens schon damals vorhanden war. Weitere wichtige Eigenschaften, wie die Fähigkeit zur starken Beugung der Finger konnten ebenfalls nachgewiesen werden. Dies sind Eigenschaften, die es dem frühen Vorfahren des heutigen Menschen ermöglichten, Werkzeuge sowohl zu benutzen als auch herzustellen (Marzke & Marzke, 2000). Diese Kultur zeichnete sich durch die Verwendung von Steinwerkzeugen aus, deren Fundort der Olduvai-Schlucht in Tansania für die Namensgebung herangezogen wurde. Im Laufe der Evolution hat sich die menschliche Hand weiterentwickelt und ist das Primärwerkzeug des Menschen. Die komplexe Hand wird als einfachste Metapher zur Verwendung in der virtuellen Realität herangezogen, da diese Metapher von jedem Menschen intuitiv verstanden werden kann. Dennoch ist die menschliche Hand in der Evolution einzigartig, und das Erlernen von zuerst grobmotorischen und später feinmotorischen Tätigkeiten vom Säuglingsalter bis in das späte Erwachsenenalter des Menschen zeigt, dass es sich bei der Hand um ein hochkomplexes und hochdynamisches Interaktionsmedium handelt. Diese Dynamik ist auch auf die Kombination mit dem menschlichen Gehirn zurückzuführen, welches die menschliche Hand auf hochvielfältige Weise einzusetzen vermag und ihr die uns gewohnte Plastizität verleiht. Der Einsatz von künstlichen Händen oder Handmodellen in der Virtualität transferiert dieses natürliche Werkzeug als Interaktionsmedium in diese und ermöglicht dem Menschen ein natürliches Verständnis für die Manipulation und die Bewegung von Objekten in einer künstlichen Welt. Die Transferierung der menschlichen Hand in die Virtualität ist seit der Existenz von virtueller Realität von hoher Relevanz und wurde seit der Erstellung von künstlichen virtuellen Welten erforscht. LaViola und Keefe (2011) bezeichnen die virtuelle Hand als die gebräuchlichste Auswahltechnik, um durch Berührung eine direkte Interaktion mit virtuellen Objekten durchführen zu können. Die Voraussetzung ist jedoch, dass sich diese Objekte am gleichen Ort, wie das virtuelle Handmodell befinden. LaViola und Keefe (2011) bezeichnen die Implementierung von virtuellen Händen insofern als einfach, wenn das künstliche Modell der menschlichen Hand einen guten Kollisionsalgorithmus mit auszuwählenden Gegenständen aufweist. Diese Herausforderung sei jedoch schon dahingehend lösbar, indem Schnittmengen zwischen virtueller Hand und Objekt nicht nur approximiert über die sogenannte „Bounding Box“, also ein Konvexes Volumen der Zielgeometrie berechnet wird, sondern über die tatsächliche Geometrie

der virtuellen Hand und des Zielobjektes. Wan, Chen und Han (2009) sehen in der Verwendung virtueller Hände in virtuellen Umgebungen eine Schlüsselrolle und ergänzen die Steuerung einer virtuellen dargestellten Hand um eine haptische Komponente, welche aus ihrer Sicht in den letzten Jahren durch das Fehlen von „Force Feedback“-Mechanismen vernachlässigt wurde. Wan et al. (2009) haben dazu ein virtuelles Modell einer Hand erstellt, welches verschiedene Aspekte der menschlichen Hand aufgreift. Im Modell berücksichtigt werden die vier Ebenen „Haut“, „Kinematik“, „Kollision“ und „Haptik“, die über einen Datenhandschuh an die Hand des Nutzers zurückgegeben werden. Die Integration von haptischem Feedback in die Virtualität wird von Wan et al. (2009) als große Herausforderung gesehen. Der vorgestellte Prototyp zeigt jedoch in ersten experimentellen Studien, dass mithilfe des virtuellen Handmodells und dem Feedback auf den Datenhandschuh der Tastsinn in die virtuelle Welt erweitert werden konnte. Ansätze zur Übertragung von Haptik auf bidirektionalem Wege zwischen virtueller Welt und der Wahrnehmung des Menschen ist Teil weiterer Forschungsarbeiten. Die Ergebnisse der vorliegenden Schrift befassen sich zunächst nur mit der Visualisierung der menschlichen Hand in der virtuellen Welt und der Reduzierung der in der virtuellen Welt hervorgerufenen visuellen Reize. Die haptische Komponente wäre eine wertvolle Bereicherung des Gesamtkonzeptes und kann für zukünftige Forschungsarbeiten auf dem hier vorgestellten Konzept aufbauen. Für die Konzepterstellung der Darstellung der menschlichen Hand in der Virtualität sind neuroergonomische Grundlagen der Wahrnehmung der menschlichen Hand notwendig, welche im nachfolgenden Kapitel beschrieben werden.

2.4 Neuroergonomische Grundlagen zur Gestaltung von virtuellen Handmodellen

Grundlegende Anforderungen für die Gestaltung der Interaktion der maritimen Lage-darstellung wie die neuroergonomischen Grundlagen von virtuellen Handmodellen werden im folgenden aus der Literatur abgeleitet. Die Betrachtung einer virtuellen Hand in einem virtuellen System muss nicht zwangsläufig intuitiv vom Nutzer verstanden werden, sobald die Hand einen bestimmten Abstraktionsgrad zu einer realen menschlichen Hand unterschreitet. Perani et al. (2001) führten eine Studie zu Reaktionen des menschlichen Gehirns bei der Betrachtung von verschiedenen

Darstellungen einer menschlichen Hand bis zu abstrakten Handmodellen durch. Dabei wurde die Aktivität der Hirnregionen der Probanden mit einem Positronen-Emissions-Tomographen gemessen. Die Versuchsteilnehmer blieben dazu passiv und betrachteten während des Versuchs lediglich Greifbewegungen der jeweiligen Handmodelle auf einem Bildschirm, während die Hirnfunktionen aufgezeichnet wurden. Die durchgeführte Studie war in zwei Teiluntersuchungen untergliedert in der jeweils eine andere Stichprobe untersucht wurde. Als erster Teil der Untersuchung diente die Abbildung einer realen Hand sowie zwei Handmodellen, wie sie in der virtuellen Realität eingesetzt werden, bei Durchführung einer jeweils gleichwertigen Greifbewegung (vgl. Abbildung 2.14). Die Handmodelle lagen jeweils in einem sich stark voneinander unterscheidenden Abstraktionsgrad vor. Im zweiten Teil der Untersuchung wurden einer weiteren Stichprobe 2D-Videos von einer Videoaufzeichnung gezeigt, in der die gleiche objektbezogene Greifbewegung in einer realen Umgebung mit einer realen Hand durchgeführt wurde. Beide Teilnehmergruppen bestanden aus jeweils acht rechtshändigen Personen ($n_{1\text{Alter}} = 24\text{-}28$ Jahre, $n_{2\text{Alter}} = 22\text{-}26$ Jahre). Während der Datenaufzeichnung im Positronen-Emissions-Tomographen war der Kopf der Versuchsteilnehmer fixiert und zusätzliche Reize während der Betrachtung der Videoaufzeichnungen durch einen schwarzen Vorhang um den Positronen-Emissions-Tomographen ausgeblendet. Als Baseline-Messung wurden den Probanden Videoaufzeichnungen von virtuellen Objekten ohne reale und virtuelle Handmodelle gezeigt. Für die Bewegungen der virtuellen Handmodelle wurden die Kinematiken realer Hände auf die Kinematiken der virtuellen Handmodelle übertragen und entsprachen „biologisch realistischen Bewegungen“, die mit den Bewegungen der realen, im Versuch verwendeten Hände vollständig vergleichbar waren. Perani et al. (2001) gingen in ihrer Hypothese davon aus, dass die Interaktion verschiedener Hirnregionen bei der Betrachtung einer echten und virtuellen Hand in einer virtuellen Umgebung differente neuronale Muster hervorruft, als dies bei der Betrachtung von realen Händen in einer realen Umgebung der Fall ist. Die Ergebnisse der PET-Scans für den Versuchsteil, in dem die Versuchsteilnehmer die Handmodelle sowie die reale Hand in der virtuellen Umgebung zu sehen bekamen, haben sowohl gleiche als auch unterschiedliche Hirnregionen aktiviert. Beispielsweise waren für alle drei Handdarstellungen Hirnregionen aktiv, die bei der Informationsverarbeitung der Aufmerksamkeit für visuelle Bewegung eine Rolle spielen. Die Versuchsergebnisse zeigen, dass alle drei Darstellungen des Handmodells eine signifikante Aktivität im

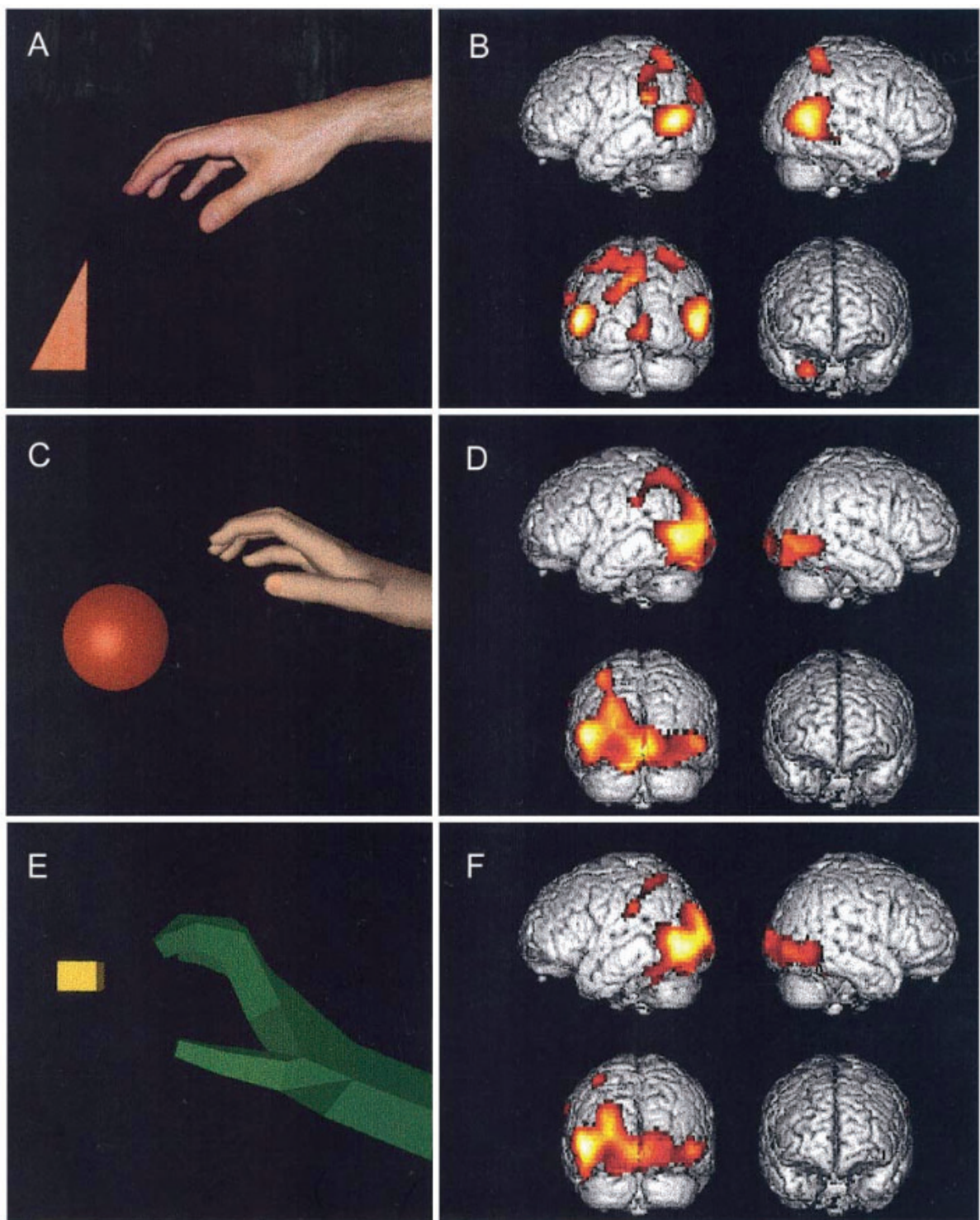


Abbildung 2.14: Ergebnisse der PET-Scans (links) von Versuchsteilnehmern bei der Betrachtung einer realen Hand und unterschiedlicher Handmodelle in der virtuellen Realität (rechts) (Perani et al., 2001)

prämotorischen Kortex bei einem Signifikanzniveau von $p = 0.05$ hervorrufen. Eine Anpassung des Signifikanzniveaus auf $p = 0.01$ ergab, dass die teilweise Aktivierung des prämotorischen Kortex nicht mehr signifikant war, was möglicherweise auf den Grad an Realismus zurückgeführt werden kann. Die virtuellen Darstellungen der Handmodelle in der virtuelle Realität riefen Hirnaktivität im Assoziationscortex hervor, die reale Darstellung der greifenden Hand tat dies jedoch nicht. Perani et al. (2001) interpretieren die Ergebnisse dahingehend, dass der realistische Grad der Visualisierung nur einen eingeschränkten Effekt auf die Aktivität der beteiligten Hirnregionen hat. Zusammenfassend kann aus den Ergebnissen die Aussage getroffen werden, dass bei der Betrachtung jedes der vorgestellten Handmodelle oder der realen Hände, ob in virtueller oder realer Umgebung, ähnliche neuronale Muster im menschlichen Gehirn erzeugt, die allesamt als „biologische Bewegung“ im Gehirn kodiert sind. Perani et al. (2001) stellen auf Basis ihrer Ergebnisse die Theorie auf, dass Reize, die durch zweidimensionale Bewegtbilder oder virtuelle Realität entstehen, als gleichwertig zu werten sind im Vergleich zu Reizen aus der realen Welt, da diese letztlich ähnliche oder gleiche neuronale Muster im menschlichen Gehirn hervorrufen. Eine „biologische Bewegung“, die der Bewegung menschlichen Körpers nachempfunden ist, wird als anthropomorph bezeichnet. Anthropomorphe Bewegungen von Modellabbildungen in der virtuellen Realität führen nachweislich zu einem besseren Verständnis der Bewegung beim betrachtenden Nutzer.

In einer weiteren Studie von Yuan und Steed (2010) konnten die beim Betrachter entstehende Immersion in virtuelle Handdarstellungen nachgewiesen werden. Grundlage der Studie sind die Ergebnisse der Studie zur sogenannten „Gummihand-Illusion“ von Botvinick und Cohen (1998). In der Studie legten die Versuchsteilnehmer ihre Hand unter einen Tisch. Auf den Tisch wurde eine realistisch aussehende Gummihand an einem künstlichen Arm so platziert, dass der Eindruck entstand, die Gummihand ist Teil des Versuchsteilnehmers. In dieser Situation wurde der Gummihand ein kräftiger Schlag mit einem Hammer versetzt. Dieser Schlag verursachte bei der am Versuch teilnehmenden Person eine Schreckreaktion, obwohl die Situation dem Versuchsteilnehmer bewusst war und die „richtige“ Hand sicher unter dem Tisch verborgen war.

Durch die Interpretation der Ergebnisse aus der Studie von Perani et al. (2001) kann schlussgefolgert werden, dass eine realistische Bewegung des Handmodells bei der Erkennung der Handbewegungen notwendig ist, damit sie vom Betrachter als „bio-

logische Bewegung“ wahrgenommen wird. Ein Vergleich mit „nicht-biologischen Bewegungen“ wurde in der Studie von Perani et al. (2001) nicht vorgenommen. Ein Vergleich von anthropomorphen mit nicht-anthropomorphen, in diesem Fall linearen Bewegungen, wurde in einer Studienreihe von Brecher, Müller, Kuz und Lohse (2013) und Kuz, Mayer, Müller und Schlick (2013) bei der Untersuchung von Trajektorien von Roboterarmen in integrativen Produktionszellen zur Teamarbeit zwischen Menschen und Robotern untersucht. Industrieroboterarme, welche keine linearen, sondern anthropomorphe Bewegungen ausführten, sollen die Akzeptanz des Menschen für die Zusammenarbeit mit Robotern bei der Teamarbeit zwischen Mensch und Maschine nach Brecher et al. (2013) erhöhen. Neben dem Aspekt der physikalischen Sicherheit bei der Kollaboration spielt auch Vertrauen des Menschen in das System sowie Systemtransparenz eine wichtige Rolle. Diese Aspekte lassen sich durch eine anthropomorphe Anpassung der Bewegung des Industrieroboterarmes erhöhen. Die dahinterliegende Theorie ist mit der Existenz spezieller Hirnregionen zu erklären, den sogenannten Spiegelneuronen. Diese sind aktiviert sobald ein Mensch eine Aktivität selbst ausführt oder die Ausführung einer Aktivität eines anderen Menschen beobachtet (Kuz et al., 2013). Nach diesem Prinzip wurde von Brecher et al. (2013) eine Methode entwickelt, mit der anthropomorphe Bewegungsmuster für die Bewegung von Industrierobotern nachgebildet werden konnten. In einer weiterführenden Studie von Kuz, Petruck et al. (2015) wurden anthropomorphe Bewegungen eines Menschen mit denen eines Industrieroboterarms an einem Probanden mittels funktionaler Magnetresonanztomographie (fMRT) verglichen (Kuz, Schlick, Lindgaard & Moore, 2015). Während des Messvorganges wurden dem Versuchsteilnehmer jeweils Videos eines digitalen Menschmodells und eines Industrieroboterarms gezeigt, die jeweils eine anthropomorphe Bewegung mit ihrem Arm durchführten. Aus den fMRT-Daten konnte abgeleitet werden, dass Spiegelneuronen sowohl bei der Betrachtung des Videos vom Industrieroboter als auch bei der Betrachtung des Menschmodells aktiviert wurden, als die anthropomorphe Bewegung ausgeführt wurde.

Um nun die zuvor beschriebenen Studien zu vereinen, kann abgeleitet werden, dass die Gesamtdarstellung eines biologischen Modells nicht zu abstrakt gewählt sein darf. Es muss die Möglichkeit gegeben sein, dass bei der Betrachtung eine ausreichende Immersion des Nutzers gewährleistet bleibt und die Bewegung eines virtuellen biologischen Objektes intuitiv vom Betrachter verstanden wird. Bei der Gestaltung

der Handmodelle für diese Arbeit wird dies berücksichtigt. Erste formative Modelle zum Einsatz der menschlichen Hand in virtuellen Umgebungen als vollwertiges Eingabemedium gab es bereits durch Edwards (1996). Die grundlegende Idee des formativen Modells war die Herstellung eines Isomorphismus zwischen der virtuellen und der realen Welt, mit dem einem Nutzer also die gleichen Möglichkeiten in der virtuellen Welt wie in der realen Welt geboten werden, nämlich Hände für Zeige- oder Greifgesten zu nutzen, um mit der virtuellen Umwelt zu interagieren. Der Einsatz von virtuellen Handmodellen in künstlichen, virtuellen Umgebungen kann nach Perani et al. (2001) für unterschiedliche Bereiche nützlich sein. Zum Beispiel wird ein Einsatz für Maßnahmen der Rehabilitation von motorischen, räumlichen oder kognitiven Störungen, die nach neurologischen Krankheiten auftreten können, vorgeschlagen. Weiteres Potential sehen Perani et al. (2001) als Trainingsmöglichkeit für Athleten als Hilfestellung zu körperlichem Training oder als Hilfsmittel in der klinischen Psychologie empfohlen. In der vorliegenden Arbeit werden Handmodelle zur Interaktion mit Datenvisualisierungen genutzt und dienen damit in erster Linie als Interaktionsmedium in der Virtualität.

2.5 Anzeigesysteme

Im folgenden Kapitel werden visuelle Anzeigesysteme beschrieben, welche imstande sind, stereoskopische sowie volumetrische Darstellungen zu erzeugen. Hierbei wird der Prozess von der Erzeugung des synthetischen Bildes aus der Geometrie bis hin zur Anzeige des fertigen Bildes oder „Frames“ auf einem Anzeigesystem beschrieben. Es werden entsprechende Anzeigesysteme unterschieden und ein Überblick über tischbasierte, stationäre Systeme gegeben, welche zum aktuellen Stand der Schrift als prototypisches System oder auf dem Verbrauchemarkt verfügbar sind.

2.5.1 Bildsynthese

Der Prozess der Bildsynthese für die Darstellung von Computergrafiken werden im folgenden beschrieben. Da die Vorgehensweise bei der stereoskopischen Bildsynthese bei der Erzeugung des Einzelbildes identisch mit der monoskopischen Bildsynthese ist, und nur zwei- oder mehrfach ausgeführt wird, wird die stereoskopische Bildsynthese beschrieben, bei der die monoskopische Bildsynthese mehrfach ausgeführt



Abbildung 2.15: Modelldarstellung der „Viewing Pipeline“ oder „Rendering Pipeline“ nach Zeppenfeld und Wolters (2004)

wird.

Monoskopische Bildsynthese

Um Geometriedaten auf einem Anzeigegerät darzustellen, wird in modernen Computersystemen dedizierte, also gesonderte, Grafikhardware verwendet. Diese Grafikhardware verfügt über eine spezielle Hardwarearchitektur, welche Befehlssätze zur Berechnung von Vektoroperationen bereitstellt und auf die Berechnung von Computergrafik spezialisiert ist. Geometrie- oder Modelldaten, welche entweder in Echtzeit über Algorithmen im Grafikspeicher erzeugt oder aus dem Arbeitsspeicher des Rechnersystems geladen werden, durchlaufen die sogenannte „Viewing Pipeline“ oder „Rendering Pipeline“ (vgl. Abbildung 2.15) (Zeppenfeld & Wolters, 2004). Für die „Sichttransformation“ werden alle Geometriedaten auf eine Projektionsebene projiziert.

Stereoskopische Bildsynthese

Für die stereoskopische Bildsynthese werden die Verfahren der monoskopischen Bildsynthese analog für Ansichten beider menschlichen Augen erstellt. Dabei werden für die jeweiligen Bildausschnitte unterschiedliche, zum menschlichen Sehapparat passende, geometrische Transformationen der dargestellten Szene berechnet. Dies sind zum einen der Konvergenzwinkel und zum anderen die querdissipate Verschiebung der synthetischen Bilder, die so gewählt sein müssen, dass diese vom Wahrnehmungsapparat des Menschen entsprechend verarbeitet werden können. Die Funktionsweise des menschlichen Auges und der dazu nachzubildende Tiefenhinweis ist in Kapitel 2.2.2 beschrieben. Um der menschlichen Wahrnehmung diesen Tiefenhinweis wiederzugeben, müssen beide synthetisch erzeugten Bilder pro Auge getrennt dargeboten werden. Derzeit verfügbare Grafikhardware unterstützt in der Regel vier unterschiedliche Techniken, die zur haploskopischen Trennung verwendet

werde können (haplos, griechisch: allein, einfach").

„Quad Buffered“ Rendering erfordert eine Grafikkarte mit spezieller Grafikhardware, die über mindestens vier sogenannte „Framebuffer“ verfügt. Auf einen Framebuffer werden Pixeldaten geschrieben, die letztendlich auf dem Displaysystem angezeigt werden sollen. Dazu durchlaufen die im Grafikspeicher vorhandenen geometrischen Daten die sogenannte „Rendering Pipeline“, eine Aneinanderreihung von Funktionen, die Bilddaten zeilenweise für die Anzeige berechnet. Diese berechneten Daten werden nun auf den „Framebuffer“ geschrieben. Sobald dieser mit Pixeldaten befüllt ist, wird der „Framebuffer“ zur Anzeige freigegeben und die Bilddaten werden auf dem angeschlossenen Displaysystem angezeigt. Wäre der zu befüllende „Framebuffer“ zum Zeitpunkt der Berechnung der einzelnen Pixeldaten zur Anzeige freigegeben, so würde dem Betrachter ein flackerndes Bild dargeboten, da Teile des „Framebuffers“ zu Beginn eines jeden neuen Bildes leer, also schwarz, sind. Um ein solches Flackern zu verhindern, arbeiten Grafikkarten mindestens mit sogenanntem „Double Buffering“, bei dem zwei „Framebuffer“ vorhanden sind. Hierbei wird zwischen anzuzeigendem „Framebuffer“, also zu schreibendem „Framebuffer“, und zu befüllendem „Framebuffer“, also zu lesendem „Framebuffer“, mit der Frequenz der Bildrate gewechselt. Der anzuzeigenden „Framebuffer“ schaltet seine Bilddaten erst zur Anzeige, wenn der Berechnungsprozess abgeschlossen ist. Während der erste „Framebuffer“ beschrieben wird, wird der zweite „Framebuffer“ zur Anzeige geschaltet und dann gewechselt. Dieser Vorgang wird fortwährend wiederholt. Für das **„Quad Buffered“ Rendering** stehen nun insgesamt vier „Framebuffer“ für den Prozess der Bildsynthese zur Verfügung. Jedes „Framebuffer“-Paar ist dabei für die Bildsynthese der perspektivische Darstellung für ein jedes Auge des menschlichen Sehapparates zuständig. Für die Anzeige werden diese vier „Framebuffer“ nun in Reihe zur Anzeige geschaltet, was dazu führt, dass im Wechsel für jedes Auge jeweils ein Bild auf dem Anzeigemedium dargeboten wird. Um dem Betrachter nun ein stereoskopisches Bild darbieten zu können, muss im richtigen Moment das jeweilige falsche Bild, also das Bild für das falsche Auge, ausgeblendet werden. Dies erfolgt mit einer sogenannten „Shutter-Brille“. Eine „Shutter-Brille“ ist mit doppelwandigen Gläsern ausgestattet, zwischen denen eine Flüssigkristallschicht liegt. Durch einen elektrischen Impuls kann die Ausrichtung der Flüssigkristalle so verändert werden, dass die Lichtdurchlässigkeit stark reduziert wird. Die Lichtdurchlässigkeit kann

so pro Auge kontrolliert werden. Eine Synchronisierung der Lichtdurchlässigkeit mit dem Bildwechsel pro Auge bewirkt nun das Ausblenden des jeweilig „falschen“ Bildes pro Auge. Ab einer Bildwiederholfrequenz von 50 Hz pro Auge nimmt der Betrachter ein flüssiges Bild wahr, es ist jedoch empfehlenswert mit Bildwiederholraten von mindestens 60 Hz oder mehr pro Auge zu arbeiten, um eine ermüdungsfreie Betrachtung zu gewährleisten.

Zeilenweise Darstellung Die zeilenweise Darstellung erfordert die Bildsynthese eines Bildes pro Auge mit passendem Konvergenzwinkel und passender Querdispersion. Hierbei werden die jeweiligen perspektivischen Darstellungen alternierend in gerade und ungerade Bildzeilen geschrieben, wodurch zwei ineinander liegende Halbbilder entstehen. Für die haploskopische Trennung ist ein spezielles Anzeigesystem notwendig, mit dem die jeweiligen Halbbilder pro Auge ausgeblendet werden können.

2.5.2 Dreidimensionale Anzeigegeräte für Desktopsysteme

Im folgenden werden Anzeigegeräte vorgestellt, welche zur Verwendung als Anzeigemedium der stereoskopischen Lagedarstellung genutzt werden können.

Stereoskopische Anzeigesysteme im Desktopbereich

Stereoskopische Anzeigesysteme sind für den Einsatz in verschiedenen Szenarien verfügbar und ermöglichen je nach Aufbau der virtuellen Umgebung einen anderen Grad der Immersion des Nutzers. Für die haploskopische Trennung existieren derzeit mehrere Verfahren, wie im vorigen Kapitel beschrieben. In der Regel wird die haploskopische Trennung des Bildes über im Displaysystem pro Zeile wechselnde Polfilter umgesetzt, wobei gerade Zeilennummern mit zirkular-polarisiertem Lichtfilter und ungerade Zeilennummern mit umgekehrt zirkular-polarisiertem Lichtfilter ausgestattet sind. Eine passende Brille, die pro Auge mit den entsprechenden Polarisationsfiltern ausgestattet ist, trennt die aufeinander liegenden Halbbilder pro Auge in Einzelbilder, die pro Auge jedoch nur noch über die halbe vertikale Zeilenauflösung verfügen. Objekte können mit negativer Parallaxe, Null-Parallaxe oder positiver Parallaxe dargestellt werden, äquivalent dazu erscheint das anzuzeigende Objekt vor, auf, oder hinter der Bildebene des Anzeigemediums (Bruder, Steinicke & Sturzlinger, 2013).

Besonders bei Überwachungsaufgaben spielen möglichst hohe Ansprüche an die Ergonomie und der damit verbundene Komfort eine wichtige Rolle. Derzeitig erhältliche stereoskopische Anzeigesysteme bilden jedoch noch nicht alle okulomotorische Tiefenhinweise gerecht ab, so dass mit aktuell auf dem Markt erhältlichen Systemen keine ausreichend komfortable Darstellung gewährleistet ist. Besonders der Konflikt zwischen Akkommodation und Vergenz kann im Laufe der Benutzung eines stereoskopischen Anzeigesystem zu Ermüdungserscheinungen und Unwohlsein führen. Die Akkommodation der Linse im menschlichen Auge akkommodiert grundsätzlich auf die Ebene der Anzeigefläche und erzeugt somit einen Konflikt zur Sichttiefe, die über den Vergenzwinkel erzeugt wird. Studien zur Benutzung von stereoskopischen Anzeigesystemen wurden von Hoffman, Girshick, Akeley und Banks (2008) durchgeführt. Die Untersuchungen ergaben, dass bei der Betrachtung eines in einer bestimmten Tiefe auf dem Stereodisplay angezeigten Objektes falsche Signale an den Ziliarmuskel des Auges gesendet werden, der für die Scharfstellung der Linse verantwortlich ist. Die Fokustiefe, die sich aus dem Vergenzwinkel ergibt, stimmt nicht mit der Wahrnehmung überein, da der Fokussierte Punkt nicht auf der Fokusebene des Auges liegt (vgl. Abbildung 2.10). Die dauerhafte Betrachtung eines stereoskopischen Displays führt dadurch zu Ermüdungserscheinungen. Grossman und Balakrishnan (2005) beschreiben eine mögliche Verbesserung der Tiefenwahrnehmung mit dem Einsatz stereoskopischer Anzeigesysteme im Desktopbereich. Darauf basierend wird für den in dieser Arbeit entwickelten Prototyp ein stereoskopisches Displaysystem eingesetzt, um den künstlichen Tiefenhinweis der Querdissipation und Konvergenz zu erzeugen. Da mit einem solchen System zwangsläufig Konflikte zwischen Konvergenz und Akkommodation auftreten, werden Unwohlsein und Simulatorkrankheit bei einer arbeitswissenschaftlichen Betrachtungsweise bei der Bewertung des Systems berücksichtigt. Da zum Entwicklungszeitpunkt der vorliegenden Arbeit autostereoskopische Anzeigesysteme für den Endverbrauchermarkt noch nicht zur Verfügung stehen, wird der in diesem Bericht beschriebene Prototyp mit der Nutzung eines passiven stereoskopischen Anzeigesystem umgesetzt. Als Anzeigemedium wird das stereoskopische Display mit zeilenweise polarisiertem Lichtfilter von ASUS, Modell VG27AH, verwendet. Für die haploskopische Trennung der jeweiligen Bilder müssen Betrachter eine vom Gewicht her leichte Brille tragen, in der pro Auge einen zirkular-polarisierten Lichtfilter verbaut ist. Durch die jeweilige Filterung des polarisierten Lichtes wird jedem Auge eine eigene Darstellung geboten, in denen jeweils

durch eine laterale Abweichung der Projektion der Eindruck einer Parallaxe erzeugt wird.

Volumetrische Anzeigesysteme

Volumetrische Anzeigegeräte bilden dreidimensionales Bildmaterial in drei physikalischen Dimensionen ab und ermöglichen damit eine realistische räumliche Betrachtung. Die Simulation von Tiefenhinweisen ist bei solchen Displaytypen nicht notwendig, dem Betrachter wird eine realistische, räumliche Darstellung präsentiert. Die eingesetzten Technologien sind unterschiedlich und sind für den Endverbrauchermarkt zu diesem Zeitpunkt noch nicht ausgereift. Die Konzepte volumetrischer Anzeigegeräte ist sehr unterschiedlich. Eine für den Massenmarkt taugliche Technologie liegt nach derzeitigem Stand der Recherche nicht vor. Ein kugelförmiges, 10" großes volumetrisches Display von Actuality Systems beispielsweise erzeugt eine dreidimensionale Abbildung durch die Darstellung von 2D-Bildern auf einer halbtransparenten, um die Y-Achse rotierenden Scheibe, wie in Abbildung 2.16 abgebildet. Die angezeigten Abbildungen haben eine Auflösung von 768x768 Pixeln und eine Tiefe von 198 Bildern, was einer Auflösung von 116.785.152 Voxeln¹ entspricht. Die Bildwiederholfrequenz wird mit 24 Herz angegeben. Eine translatorisch-oszillatorische Technologie wird von Boll (2015) verwendet. Laut Hersteller liegt inzwischen eine marktreife Version des volumetrischen Anzeigegerätes vor, welches von seinen Herstellern nach dem Entwickler Peter Boll als „Bollograph“ bezeichnet wird. Auch hier wird eine halb-transparente Scheibe verwendet, die in einer schnellen Bewegung von LED's angestrahlt wird und so den Eindruck eines dreidimensionalen Bildes erweckt. In der aktuellen Generation kann eine Auflösung von 250x250x1000 (62,5 Millionen) Voxeln angezeigt werden.

Die hier vorgestellten Systeme bieten zwar schon eine reale volumetrische Darstellung, sind jedoch durch die eingesetzte Technologie in ihrem Einsatz stark eingeschränkt. Da sie relativ viel Platz für ein sehr geringes Anzeigevolumen benötigen und auch die Auflösung noch sehr gering ist, wird ein Einsatz für das prototypische System nicht in Betracht gezogen.

¹Voxel: Pixel im dreidimensionalen Raum in x,y,z

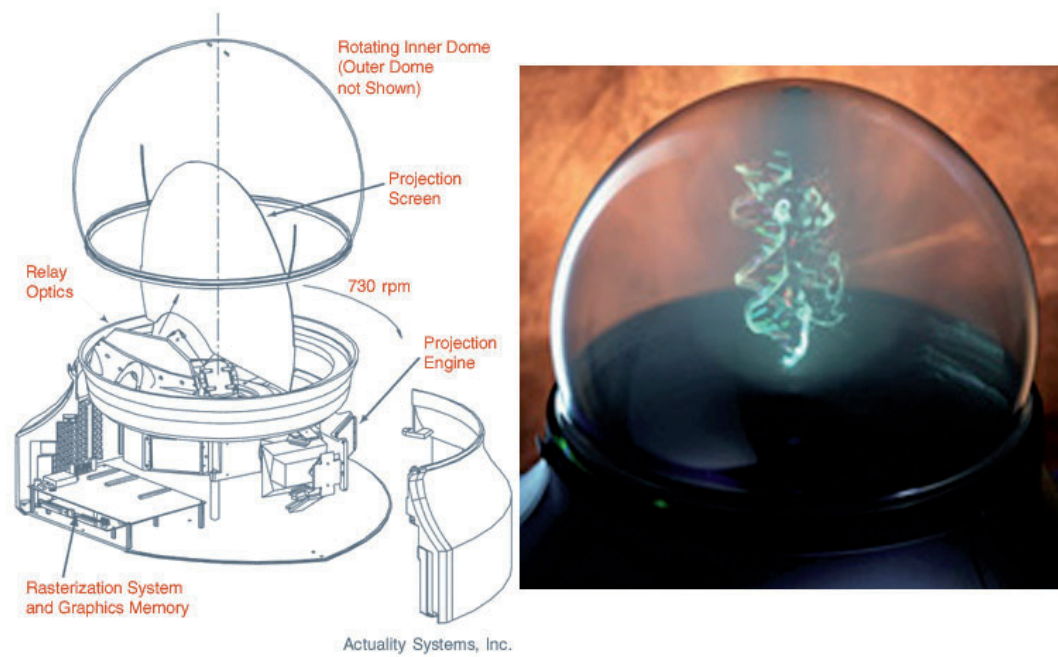


Abbildung 2.16: Rotatorisches 3D-Display mit einer Größe von 10" (Abbildung entnommen aus Grossman und Balakrishnan (2004))

2.6 Eingabesysteme

Zur Informationsübertragung vom Menschen in das technische System ist die Wahl eines angemessenen Eingabesystems erforderlich. Der Datenfluss bei einer Systemeingabe in ein virtuelles System ist in Abbildung 2.17 nach Flemisch, Kelsch, Löper, Schieben und Schindler (2008) dargestellt. Virtuelles System und Nutzer nehmen jeweils Informationen aus der Umwelt auf. Beide Teilsysteme können kooperativ zusammenarbeiten und geteilte Kontrolle in eine Aktion umsetzen. Das virtuelle System kann unterstützend auf die Absicht des Nutzers einwirken. Über Ein- und Ausgabemedien können Nutzer und virtuelles System interagieren. Dabei sind Ein- und Ausgabesystem nicht zwangsläufig getrennt voneinander zu betrachten. Insofern Ein- und Ausgabemedien verwendet werden, die berührungsempfindliche Eingaben ermöglichen und dabei ein haptisches Feedback erzeugen, existiert zwischen Ein- und Ausgabemedium ein Informationsaustausch, der vom Nutzer aktiviert werden kann, oder vom System in bestimmten Situationen Information an den Nutzer überträgt (vgl. dazu auch Flemisch, Bengler, Bubb, Winner und Bruder (2014)). Auch weitere Wahrnehmungskanäle zum Austausch, wie beispielsweise der visuelle Kanal, können als Feedback verwendet werden, wenn das haptische Feedback in beispielsweise einer vollständig virtuellen Umgebung nicht vorhanden ist.

Ein Eingabesystem erfasst die Eingaben des Menschen auf einer oder mehreren modalen Ebenen, je nach Notwendigkeit der Eingabe, die manuell, verbal, gestikulär oder auf Basis von Bewegung erfolgen kann (vgl. Abbildung 2.18). Zur genauen Klassifizierung von Eingabesystemen steht die maximal mögliche Anzahl an Freiheitsgraden im Vordergrund, die mit dem Eingabesystem manipuliert werden können. Als ein Freiheitsgrad wird die unabhängige Bewegung eines Körpers im Raum bezeichnet. Für eine Bewegung im dreidimensionalen Raum sind mindestens drei rotatorische sowie drei translatorische Freiheitsgrade notwendig.

Die Wahl eines Eingabesystems sollte stets aufgabenspezifisch erfolgen, da sich Eingabegeräte in vielen Punkten wie Ergonomie, Eingabemodi, Datenerfassung und Präzision unterscheiden. Der Einsatz verschiedener Eingabesysteme für verschiedene Aufgaben sollte somit in Betracht gezogen werden (Bowman, 2005, S. 126 FF.). Die Eingabe kann durch Stellteile erfolgen, die vom Nutzer manuell bedient werden, oder durch Signalerfassung auf der verbalen, gestikulären oder auf der Bewegungsebene erfolgen. Diese vom Nutzer erzeugte Information wird über eine Schnittstelle auf-

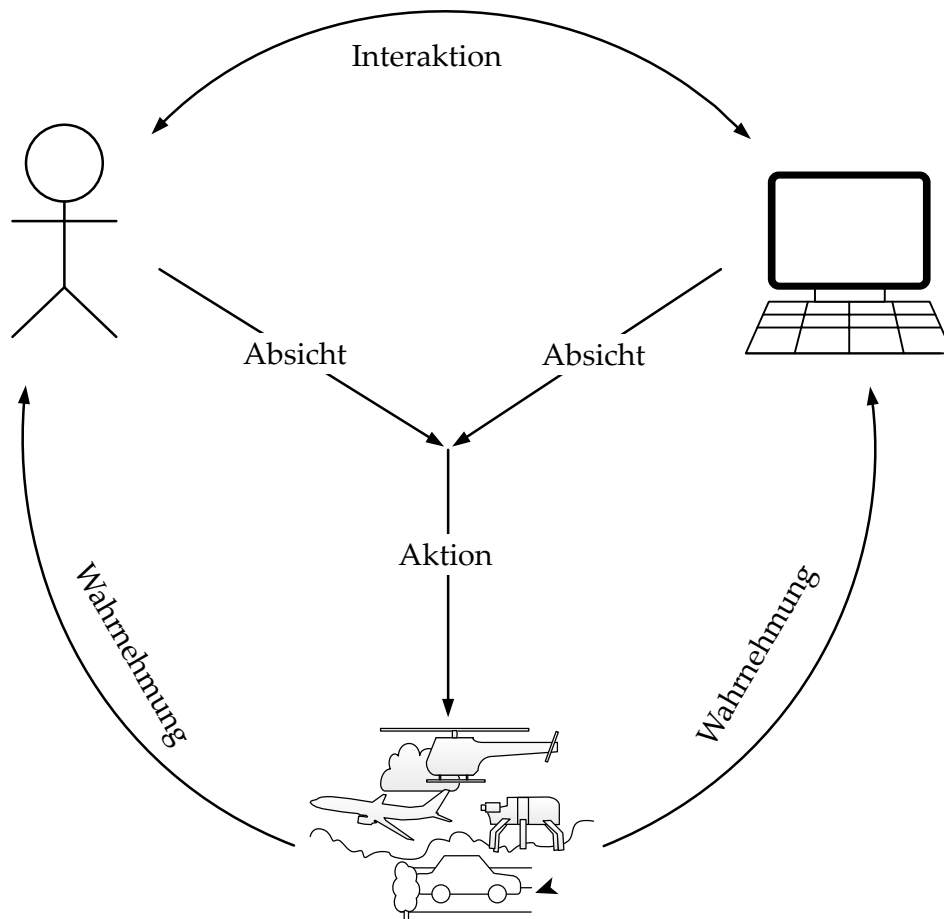


Abbildung 2.17: Nutzerabsicht zwischen Mensch und Computer bei Nutzereingabe nach Flemisch, Kelsch, Löper, Schieben und Schindler (2008), angepasste Darstellung

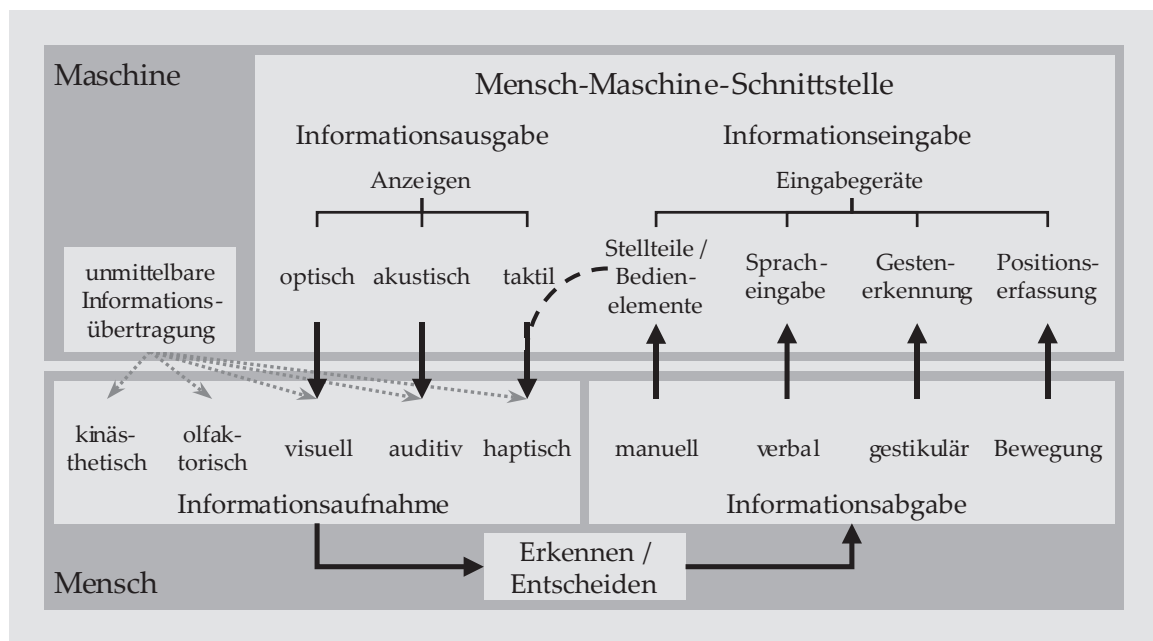


Abbildung 2.18: Ein- und Ausgabesysteme nach Schlick, Luczak und Bruder (2010, S. 971 FF.), erweiterte Darstellung

gezeichnet und in digitale Signale umgewandelt. Auf der Signalebene wird diese Information dann in diskrete, kontinuierliche oder einer Kombination aus beiden Signaltypen umgewandelt. Diskrete Information umfasst typischerweise binäre Daten oder Daten aus einem vorbestimmten Datensatz, während kontinuierliche Daten einen Datenfluss eines bestimmten Datentyps wie beispielsweise Positionsdaten eines Trackingsystems erzeugt (Bowman, 2005, S. 88 FF.).

2.7 Auswahltechniken für erweiterte und virtuelle Umgebungen

Die Möglichkeit zur Gestaltung von Auswahltechniken in virtuellen und erweiterten Umgebungen ist vielfältig. Die Interaktion des Menschen mit Objekten in der realen und virtuellen Welt basiert auf der Annahme, dass sich jede Art der Interaktion in sogenannte kanonische Elementen der Manipulation unterteilen lassen. Diese kanonischen Elemente sind **Selektion**, **Positionierung**, und **Rotation** (Bowman, 2005, S. 141 FF.). Eine direkte Interaktion mit Elementen aus der realen Welt unterliegt also stets

wiederkehrenden Mustern, die stets aus diesen drei kanonischen Grundelementen zusammen gesetzt sind welche für die Objektinteraktion maßgeblich sind. Dennoch wird die Gestaltung von Auswahl- und Manipulationstechniken in der virtuellen und erweiterten Realität stark von zwei unterschiedlichen Ansichten geprägt. Bei der *isomorphistischen* Art der Auswahl- und Manipulationstechniken herrscht eine starke Analogie zur Interaktion mit realen Objekten, sie entsprechen also stark den Gewohnheiten des Menschen, wie sie aus der realen Welt bereits bekannt und von Geburt an trainiert sind. Das isomorphistische Interaktionsparadigma wird auch häufig als „naturalistische Interaktion“ bezeichnet. Demgegenüber steht die Ansicht, dass genau dieser Isomorphismus die Interaktion maßgeblichen Einschränkungen unterliegt (Bowman, 2005, S. 146 FF.). Bowman (2005) zählt hierzu gleich mehrere Einschränkungen auf. Zum einen sind die sensorischen Abbildungsmöglichkeiten von zur Verfügung stehenden Eingabegeräten bereits als erste Einschränkung zu sehen, was zum Beispiel häufig zu begrenzten Reichweite bei der Erfassung von menschlichen Bewegungen führt. Weiter zählt Bowman (2005) die Einschränkung auf, denen menschliche Bewegungen natürlicherweise unterliegen, wie etwa die Länge der Körperteile, die als Eingabeparameter in ein System oder künstliche Welt verwendet werden, und durch den Isomorphismus die Reichweite im System vorgeben. Bowman (2005) stellt fest, dass die Abbildung der physikalischen Realität in die Virtualität deshalb nicht zwingend sinnvoll ist, sondern vielmehr die Übertragung von Interaktionstechniken in die Virtualität so gewählt sein sollte, dass sie auf die künstliche, dreidimensionale Welt spezifisch passen und in der Hinsicht eine Art „bessere“ Realität bereitstellen. Den nicht-isomorphistischen Ansatz beschreibt Bowman (2005) als von der Realität stark abweichend so: Hier sollen zur Interaktion Werkzeuge bereitgestellt werden, die in der realen Welt nicht existieren oder gar existieren können und zählt Beispiele auf wie flexible künstliche Arme oder etwa Laserstrahlen. Mit solchen nicht-isomorphistischen virtuellen Werkzeugen können nach Bowman (2005) Objektmanipulationen in künstlichen Welten vorgenommen werden, für deren Bedienung die Benutzungsfreundlichkeit und Performanz weiterhin gewährleistet werden können. Das Ziel bei der Entwicklung von Manipulationstechniken in der Intefacedesign-Entwicklung ist die Bereitstellung von neuen, performanten Eingabetechniken, aber auch die Wieder- bzw. Weiterverwendung bereits bestehender Eingabetechniken, bei denen Performanz und hoher Komfort bei der Nutzung gegeben sind (Bowman, 2005, S. 139 FF.). Zeigebewegungen auf dreidimensionale

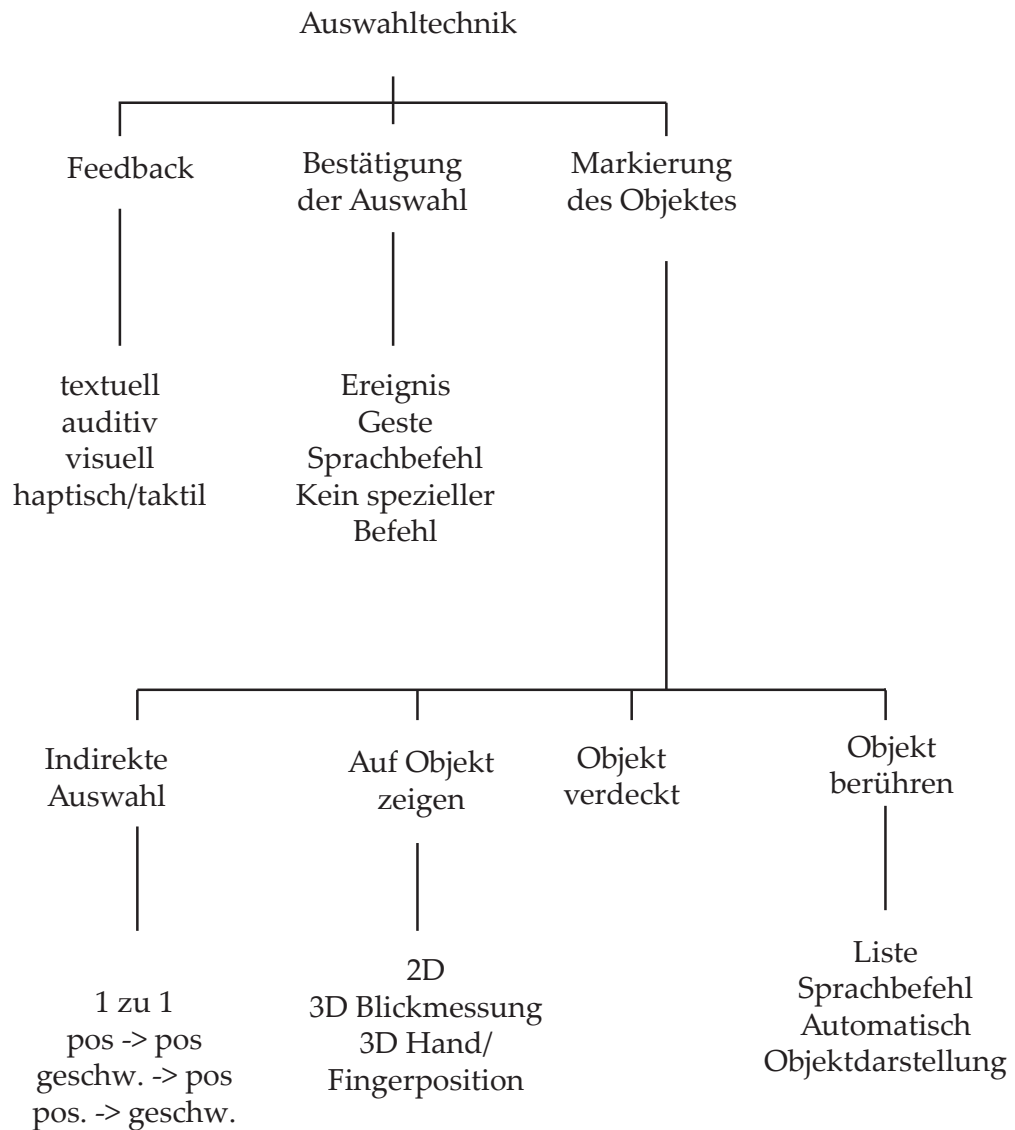


Abbildung 2.19: Klassifizierung von Auswahltechniken nach Aufgabeneinteilung nach Bowman (2005)

Zielobjekte zur Objektselektion sind essentiell zur Erfüllung von Aufgaben bei der Steuerung von dreidimensionalen Mensch-Maschine-Schnittstellen. Trotz der häufig gegebenen Analogie zur Ausführung von Zeigebewegungen auf einer zweidimensionalen Ebene sind eine Reihe besonderer Unterschiede zu beachten (Stuerzlinger & Teather, 2014), die einerseits durch die in Kapitel 2.2.2 beschriebenen Tiefenhinweise definiert sind und andererseits durch die unterschiedlichen Eingabesysteme, da bisher keine eindeutige Definition für Eingabegeräte dreidimensionaler Mensch-Maschine-Schnittstellen existiert, es existieren lediglich Empfehlungen für bestimmte Einsatzgebiete aus der Forschung (Stuerzlinger & Teather, 2014). Die Herstellung einer genauen Analogie von Interaktion in der virtuellen Welt zur realen Welt bringt auch nach Stuerzlinger und Teather (2014) nicht grundsätzlich Vorteile. Eine solche isomorphistische Umsetzung der Interaktion steigert sicher die Immersion und die Natürlichkeit einer Eingabemethode. Jedoch werden damit gleichermaßen auch Einschränkungen mit übernommen, die durch die physikalische Realität gegeben sind.

2.7.1 Manipulationsverfahren

Der folgende Abschnitt gibt einen Überblick über unterschiedliche Methoden wieder, die in virtuellen Umgebungen eingesetzt werden, um eine Auswahl zwischen verschiedenen virtuellen Objekten zu treffen und zu selektieren. Dies geschieht in der Regel über Zeigebewegungen, die über ein Interaktionsmedium in der virtuellen Umgebung vorgenommen werden. In der DIN EN ISO 9241-16 (1999) „Ergonomische Anforderungen Für Bürotätigkeiten Mit Bildschirmgeräten, Teil 16: Dialogführung Mittels Direkter Manipulation“ werden Grundlagen zur direkten Objektmanipulation definiert. Ein auf der direkten Manipulation basierendes Dialogdesign sollte die Anlernzeit minimieren sowie die Effizienz des Nutzers steigern. Dies umfasst sowohl die Manipulation eines Dialoges selbst als auch das daraus für den Nutzer wahrnehmbare Feedback. Abbildung 2.20 zeigt eine Taxonomie nach Bowman (2005), welche verschiedene Manipulationsverfahren einordnet. Bei Zeigebewegungen ist die Gesetzmäßigkeit von Paul Fitts relevant, mit der bestimmt werden kann, wie sich Bewegungszeit zu Zielobjekt bei der Benutzung eines bestimmten Interaktionsmediums zueinander verhalten. Die Grundlagen zum Fitts'schen Gesetz sind in Kapitel 2.2.4 beschrieben. Nach Teather und Stuerzlinger (2011) unterscheiden sich Methoden

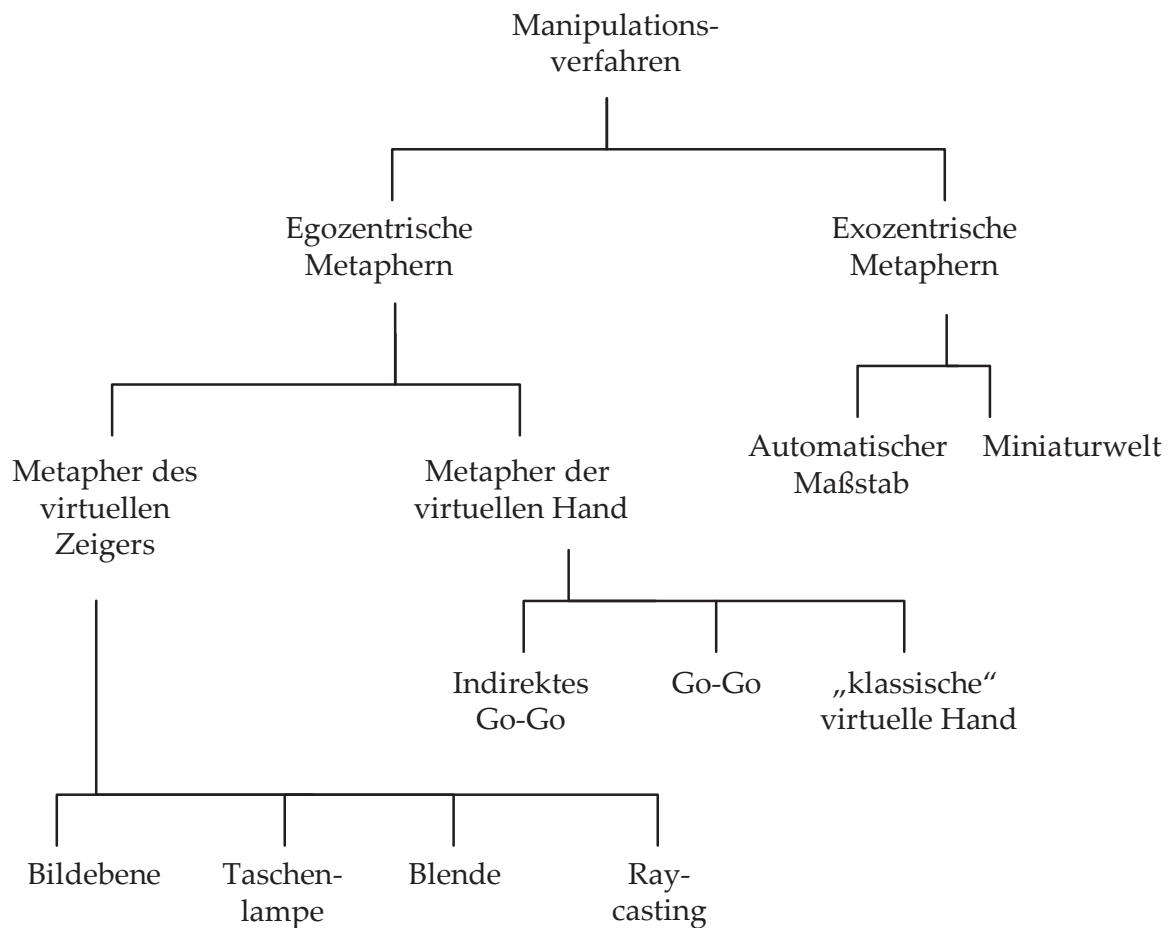


Abbildung 2.20: Manipulationsverfahren in virtuellen Umgebungen nach Bowman (2005)

zum Zeigen und Manipulieren von Objekten in virtuellen Umgebungen durch zwei maßgebliche Paradigmen. Dies sind zum einen Strahl- oder verdeckungsbasierte Prinzipien und virtuelle Handmetaphern. Bowman (2005) fasst diese beiden Interaktionsmetaphern für virtuelle Realitäten als egozentrische Metaphern zusammen, denen exozentrische Metaphern gegenüberstehen. Zu den exozentrischen Metaphern gehören die Metapher der „Miniaturwelt“ und des „Automatischen Maßstabes“ (vgl. Abbildung 2.20). Bei der Anwendung des Strahl- oder verdeckungsbasierten Prinzips wird ein virtueller Strahl vom Zeigewerkzeug des Nutzers in die virtuelle Welt berechnet. Sobald dieser Strahl auf ein virtuelles Objekt trifft, wird eine entsprechende Manipulation oder Interaktion eingeleitet. Die Handmetapher dagegen erfordert einen Schnittpunkt der Position der virtuellen Hand mit der Position des zu manipulierenden Objektes (Teather & Stuerzlinger, 2011). Die Visualisierung solcher Handmetaphern oder virtuellen Händen erfolgte stets sehr unterschiedlich und ist nicht zuletzt abhängig von der Technologie, die zur Erfassung der Hand des Nutzers angewendet wird. Oft wird schon die bloße Darstellung eines virtuellen Zeigers als metaphorische Darstellung der Hand verstanden. Um das Interaktionsmedium für eine virtuelle Umgebung richtig auswählen zu können, sollten Interaktionsmedium und Zielobjekte, auf die gezeigt werden soll, sinnvoll gewählt sein. Im folgenden sind verschiedene Manipulationsverfahren und eine mögliche Auswahl von Zielobjekten beschrieben.

„Virtueller Zeiger“-Metapher

Grossman und Balakrishnan (2004) untersuchen dreidimensionale Zeigebewegungen auf trivariate Ziele in volumetrischen Displayumgebungen und nutzen dazu ein virtuelles Fadenkreuz, welches als „Virtueller Zeiger“-Metapher bezeichnet wird. Als Grundlage für die Untersuchung der Zeigebewegungen wird ein bivariates Modell des Fitts'schen Gesetzes angewendet, welches von Grossman und Balakrishnan (2004) für Zeigebewegungen auf trivariate Ziele für diese Studie erweitert und evaluiert wird (vgl. Kapitel 2.2.4). Als Anzeigegerät wird das volumetrische Display von Actuality Systems verwendet, welches durch eine halbtransparente, rotierende Ebene ein dreidimensionales Bild mit einer Auflösung von 768x768 Pixel erzeugt (Abbildung des Gerätes unter 2.16). Die Bildwiederholrate liegt bei 24 Hz und ist damit gerade in der Lage, ein für die menschliche Wahrnehmung flüssiges Bewegtbild zu erzeugen.

Als Eingabegerät wurde der elektromagnetische Sensor Flock-Of-Birds von Ascension mit einem Eingabeknopf und sechs Freiheitsgraden eingesetzt um einen Cursor in der volumetrischen Umgebung zu kontrollieren. In der Studie mit fünf weiblichen und sieben männlichen Teilnehmern wurde ein faktorielles Design mit Messwiederholung eingesetzt, als unabhängige Faktoren wurden die Amplitude A , Zielhöhe H , Zielbreite W , Zieltiefe D sowie der Winkel in Bewegungsrichtung α festgelegt.

„Virtuelle-Hand“ und „Travel“-Metapher

Die „Virtuelle-Hand“-Technik ist eine isomorphe Interaktionstechnik und daher eher intuitiv, da sie die Interaktion mit der Alltagsextremität direkt simuliert. Ein Grundproblem dabei ist jedoch, dass nur mit Objekten innerhalb der Reichweite des Nutzers interagiert werden kann. Um mit Objekten außerhalb der Reichweite interagieren zu können, muss eine „Travel“-Methode (to travel, eng.: reisen, an einen Ort reisen) angewendet werden, die es ermöglicht sich zu den Objekten hinzubewegen. Die Implementierung einer „Travel“-Methode ist meist unpraktisch und erhöht die Komplexität der Benutzungsoberfläche (Bowman, 2005), da die Bewegung an einen bestimmten Ort in der virtuellen Umgebung nach Bowman und Hodges (1997) in mehrere Unterparameter untergliedert ist, die jeweils über verschiedene Interaktionsparameter umgesetzt sind:

1. **Richtungs- oder Zielelektion** spezifiziert die wichtigste Unteraufgabe, in der Nutzer die *Art der Bewegung* und die *Zielkoordinate* wählen.
2. **Velozität und Beschleunigung** um Nutzern Kontrolle über die Bewegungsgeschwindigkeit zu ermöglichen.
3. **Eingabeparameter** um Nutzern Kontrolle über Anfang, Kontinuität und Ende der Bewegung zu ermöglichen.

Um Komplexität der Interaktion in einer virtuellen Umgebung zu vermeiden, ist die Bereitstellung einfacher, aus der realen Welt bekannter Metaphern möglich, indem der Nutzer sich beispielsweise isomorphistisch fortbewegt: Bowman (2005) schlägt dazu einfaches „Laufen“ an die jeweilige Stelle in der virtuellen Welt vor, was jedoch nur in voll-immersiven virtuellen Umgebungen umsetzbar ist. Eine Variante möglicher Platzbeschränkungen entgegenzuwirken, ist der Einsatz eines zweidimensionalen Laufbandes, auf dem der Eindruck einer Bewegung auf einer Ebene entsteht.

Durch die Zweidimensionalität kann die Bewegungsrichtung frei gewählt werden, durch die Oberflächenbeschaffenheit des Laufbandes und durch Tragen von bestimmt besohlttem Schuhwerk, rutscht der Nutzer in seine Ausgangsposition zurück, die Kombination mit Immersion und Imagination in die virtuelle Welt erzeugen dabei ein realistisches Gefühl der Laufbewegung. Solche Hardwarelösungen sind inzwischen auch für den Endverbrauchermarkt verfügbar. Von Dörner, Broll, Grimm und Jung (2016) werden eine Reihe von Lösungen aufgezählt, die das beschriebene oder ähnliche Prinzipien verwenden. Auf dem Endverbrauchermarkt erhältlich ist das Produkt „Virtuix Omni“, welches inklusive der speziell notwendigen Rutschschuhe erhältlich ist und mit der voll-immersiven Virtual Reality Lösung Vive von HTC kombiniert werden kann (vgl. Abbildung 2.21). Auf dieser Plattform hat der Nutzer Bewegungsmöglichkeiten von 360° und kann sich so immersiv in der virtuellen Realität auf Ziele zubewegen, ohne dass in der Realität große Standorteinschränkungen auftreten. In Die Kombination mit einer solchen Fortbewegungsmethode in einer virtuellen Umgebung ermöglicht neben der isomorphistischen Manipulationsmethode der virtuellen Hand auch eine isomorphistische Fortbewegungsmethode und damit einen hohen Grad der Immersion.

„Travel“ ist auch durch weitere Methoden umsetzbar, die nicht zwangsläufig isomorphistisch zur Realität sein müssen. Voll-immersive Virtual Reality Gesamtlösungen wie die HTC-Vive, verfügbar über Valve’s Steam Plattform, ermöglichen ihren virtuellen Charakteren das „beamen“ oder teleportieren an einen zuvor selbst ausgewählten Ort. Dieser Ort muss sich mit der verwendeten Methode in Sichtweite befinden und wird über einen in die virtuelle Welt gezeichneten Bogen, welcher aus der Egoperspektive an das gewünschte Ziel reicht. Diese Metapher wurde von Lipp (2017) aufgenommen und in ein GIS-Tool auf der Basis von ESRI’s ArcGIS integriert. Daten aus ArcGIS können über einen Workflow in Unity3D für die HTC so aufbereitet werden, dass sie in der virtuellen Realität in der Ego-Perspektive erlebbar sind. Die Fortbewegung erfolgt für kurze Distanzen zu Fuß oder für längere Distanzen per Teleport (vgl. Abbildung 2.22). Eine günstig gewählte Fortbewegungsmethode in der virtuellen Welt kann den Grad der Immersion und das Gefühl von Präsenz steigern. Isomorphistische Methoden der Fortbewegung erfordern jedoch viel Raum und die nötige Bewegungsfreiheit. Bei Anwendungsszenarien von virtueller Realität, die in Schreibtischumgebungen zum Einsatz kommen sollen, ist dieser Platz in der Regel nicht vorhanden. Hier gilt es, den begrenzten Raum so zu nutzen, dass eine



Abbildung 2.21: Virtuix Omni Treadmill: Zweidimensionale Laufbandplattform zur Steigerung der Immersion und Fortbewegung in der Virtuellen Realität



Abbildung 2.22: ESRI ArcGIS GIS2VR: Virtueller Teleport durch eine virtuelle Stadt Lipp (2017)

Erreichbarkeit aller virtuellen Entitäten ohne Einschränkungen möglich ist.

„Go-Go“-Technik

Die „Go-Go“-Technik stellt eine einfache Interaktionsmethode dar, die eine interaktive Anpassung der virtuellen Armlänge ermöglicht und gehört damit auch zur Metapher der virtuellen Hand. Ist die Hand des Nutzers nah am Körper (die Entfernung vom Körper zur Hand ist unter einem gewissen Schwellwert), wird die Bewegung der realen Hand eins zu eins in die virtuelle Realität übertragen. Steigt die Entfernung vom Körper zur Hand über den Schwellwert, ändert sich das Mapping zu nicht-linear, d.h. der virtuelle Arm „wächst“, wodurch dem Nutzer die Interaktion mit entfernteren Objekten ermöglicht wird. So kann durch die eigene Handbewegung die virtuelle Reichweite verändert werden. Eine ausführliche Beschreibung dieser Interaktionsmethode wird von Poupyrev, Billinghurst, Weghorst und Ichikawa (1996) vorgenommen. Auch hier wird die menschliche Hand des Nutzers als ideales Instrument zur Interaktion beschrieben und als Werkzeug zur direkten Manipulation von Objekten in der virtuellen Realität eingesetzt. Zur Erweiterung der virtuellen Hand auf entfernte Objekte setzen Poupyrev et al. (1996) das folgende Modell ein, welches den Vektor $\bar{R}_r$ auf den Vektor $\bar{R}_v$ erweitert:

$$R_v = F(R_r) = \begin{cases} R_r, & \text{wenn } R < DR_r + k(R_r - D)^2, \text{sonst} \end{cases} \quad (2.8)$$

k stellt dabei eine Koeffiziente dar: $0 < k < 1$. Die Vektoren $\bar{R}_r$ und $\bar{R}_v$ besitzen die gleiche Orientierung mit einer unterschiedlichen Magnitude. Die „Go-Go“-Technik bietet die Möglichkeit der direkten, nahtlosen Objektinteraktion mit sechs Freiheitsgraden, nicht nur in der Nähe des Körpers, sondern auch weiter entfernt. So wird der Interaktionsradius vergrößert, allerdings bleibt er endlich. Weiterhin werden in größerer Entfernung kleinere reale Bewegungen zu immer größeren virtuellen Bewegungen, was eine präzise Interaktion verhindert. Verschiedene Studien haben die „GoGo“-Technik in verschiedenen Interaktionsaufgaben evaluiert. Dabei zeigten sich keine Verständnisschwierigkeiten seitens der Nutzer. „Go-Go“ ist in Auswahlaufgaben weniger effektiv als die Methode des „Ray-Casting“; die Möglichkeit der Interaktion im gesamten Interaktionsraum ist die große Stärke der „Go-Go“-Technik, eine feinmotorische Interaktion mit fernerer Objekten kann jedoch mit dem Einsatz dieser Technik problematisch sein.

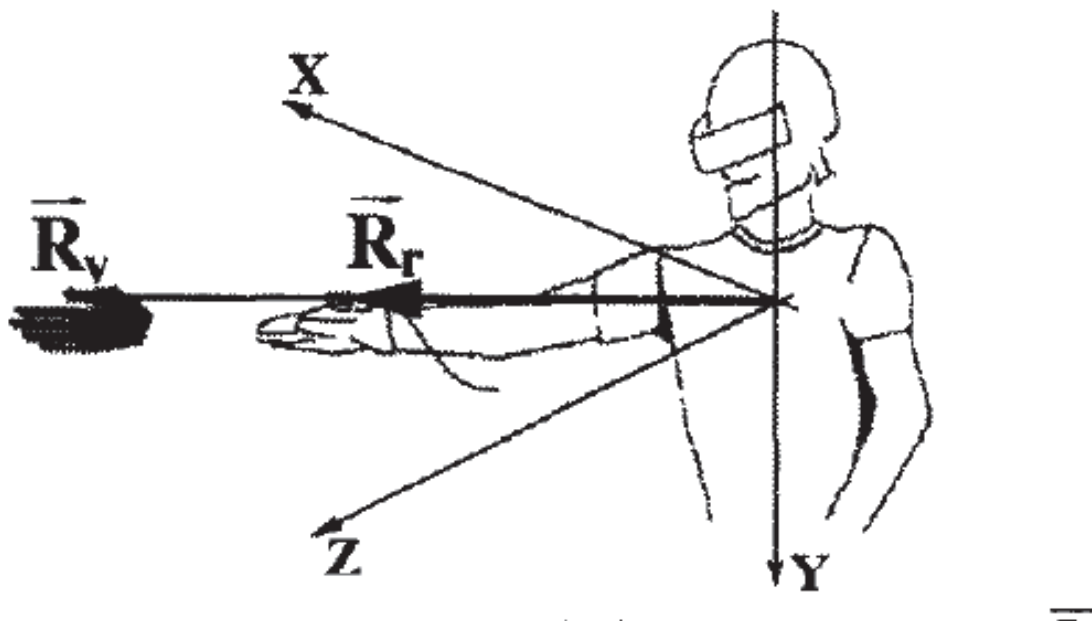


Abbildung 2.23: GoGo-Interaktionstechnik nach Poupyrev, Billinghurst, Weghorst und Ichikawa (1996): Die Position der realen Hand ist durch Vektor $\bar{R}_r$ gekennzeichnet; die Position der virtuellen Hand durch $\bar{R}_v$

„World-In-Miniature“-Technik

Eine Alternative zur Verlängerung der Armlänge ist eine maßstabsgetreue Verkleinerung des gesamten Interaktionsraumes. So kann der Nutzer indirekt mithilfe ihrer Repräsentationen in der WIM (Abkürzung für: „World in Miniature“) mit den virtuellen Objekten interagieren. Bei der Anwendung der WIM-Technik ist der Transformationsprozess zwischen den Koordinatensystemen der WIM und der ursprünglichen virtuellen Umgebung von besonderer Bedeutung. Außerdem ist die Nutzung von sogenannten „Backface Culling“-Techniken² zu beachten; so sollte nur die Innenseite der Wände eines Raumes berechnet werden, damit der Nutzer die Einrichtung aus jedem Blickwinkel erkennen kann. Der große Vorteil dieser Technik ist die einfache Interaktion mit einem Objekt, unabhängig davon, ob es innerhalb oder außerhalb der Reichweite des Nutzers ist. Zusätzlich kann die Interaktion mit der Navigation kombiniert werden, da der Nutzer auch sein eigenes virtuelles Abbild in der WIM bewegen kann, falls dies notwendig ist. Ein Nachteil jedoch ist die ungünstige Skalierung von großen Umgebungen. Dort müsste ein großer Skalierungs-

² „backface culling“, engl.: Methode aus der Computergrafik, bei der bestimmte Teile bei der Berechnung einer computergenerierten Welt weggelassen werden, um Rechenleistung einzusparen.

faktor angewendet werden, was zu sehr kleinen Objektabbildungen führen kann. Das wiederum erschwert eine präzise Interaktion mit virtuellen Objekten und beeinflusst die Feinmotorik negativ. Dieses Problem könnte gelöst werden, indem es dem Nutzer ermöglicht wird, nur Teile der Umgebung auszuwählen und diese zu skalieren. WIM ist besonders erfolgreich in 3D-Oberflächen, die in der erweiterten Realität dargestellt sind, angewendet worden. Ein praktischer Anwendungsfall ist die Interaktion mit Desktopbenutzungsoberflächen, da hier häufig nur begrenzter Platz vorhanden ist, und die Darstellung mit der direkten Manipulation durch Eingabegeräte mit sechs Freiheitsgraden durch das begrenzte Raumangebot gut kombinierbar sind.

2.7.2 Zielobjekte

Die Form der Zielobjekte, auf welche der Nutzer Zeigebewegungen ausführt, ist als entscheidender Faktor den Gestaltungsprozess einer Fitts'schen Zeigaufgabe mit einzubeziehen. Die Auswahl beeinflusst die Gestaltung der interaktiven Zielelemente, die im Interaktionsmodell eingesetzt werden sollen. Die Gestaltung der Aufgabe soll kreis- oder kugelförmigen Zielen, welche also nur eine Größendimension aufweisen, erfolgen. Da Zielobjekte in dreidimensionalen Darstellungen demnach monovariat, aber auch bivariat als auch trivariat dimensioniert sein können, gilt es, den Einsatz verschiedener Zielobjekte für die Gestaltung der für die Versuchsdurchführung einzusetzenden Zeigaufgabe zu prüfen. Stuerzlinger und Teather (2014) führte für die Auswahl möglicher Zielobjekte Untersuchungen durch. Die Auswahl für Ziele bei Zeigebewegungen in dreidimensionalen Umgebungen wird durch verschiedene Faktoren beeinflusst, die im wesentlichen durch Tiefenhinweise (vgl. Kapitel 2.2.2) beschrieben werden können. In einer Studie wurden verschiedene Formen für Zielobjekte unter Verwendung des Fitts'schen Gesetzes für Zeigebewegungen im zwei- sowie dreidimensionalen Raum untersucht. Die Untersuchung betrachtet univariate, bivariate sowie trivariate Ziele (vgl. Abbildung 2.24). Die Kugel, als dreidimensionale Erweiterung der Scheibe, kann als monovariates Ziel verwendet werden, da ihre Dimensionalität eins beträgt, die Darstellung in der Dreidimensionalität erzeugt durch Beleuchtungskonzepte in der Computergrafik aber trotzdem einen Tiefeneindruck. Stuerzlinger und Teather empfehlen bei der Darstellung von Zielen in der Dreidimensionalität die Umgebung mit weiteren Tiefeneindrücken zu bereichern, wie beispielsweise Texturen, um die Objektwahrnehmung in der stereoskopischen Tiefe zu

verbessern. Die Treffsicherheit für die entsprechende Eingabemodalität kann dadurch erhöht werden. Grossman und Balakrishnan (2004) wenden das Fitts'sche Gesetz an, um Zeigebewegungen auf Ziele zu validieren, deren Größe in drei räumlichen Dimensionen variiert. Das Interaktionsmedium wurde durch ein Fadenkreuz umgesetzt, dessen dreidimensionaler Standort über einen handgesteuerten elektromagnetischen Tracker mit sechs Freiheitsgraden verändert werden konnte. Als Anzeigemedium setzen Grossman und Balakrishnan (2004) ein volumetrisches Display mit sphärischem Anzeigevolumen ein, in welchem eine zweidimensionale leuchtende Bildebene durch Rotation ein dreidimensionales Bild erzeugt. In der Studie wird ebenfalls der Winkel der Zeigebewegungen untersucht. Aus den Ergebnissen der empirischen Studie leiten Grossman und Balakrishnan (2004) Implikationen zu Zielgröße und Zielpositionierung ab und konnten beobachten, dass die Cursor-Bewegung bei der Auswahl von Zielen vorwärts und rückwärts in der Tiefe langsamer von staten ging, als die Bewegung von links nach rechts. Die Zielbreite ist nach Grossman und Balakrishnan (2004) kritischer zu betrachten, als die Höhe und Tiefe des Ziels. Die Wirkung der Breite und Tiefe ist vom Bewegungswinkel des Interaktionsmediums abhängig, während die Höhe unabhängig vom Bewegungswinkel konstant war. Grossman und Balakrishnan (2004) haben Aufbauend auf früheren Arbeiten zu univariaten und bivariaten Zeigaufgaben eine Variante des Fitts'schen-Gesetzes eingeführt und validiert, die Modelle, die trivariate Ziele in dreidimensionalen Umgebungen berücksichtigen.

2.8 Immersive Informationsdarstellung und Maritime Datenvisualisierung

Im folgenden werden Systeme und Methoden aus der Forschung vorgestellt, die zur Anzeige verschiedener Datensätze zum Einen im Bereich der maritimen Navigation und geographischen Informationsdarstellung genutzt werden, und aus weiteren Nutzungskontexten, wie beispielsweise der Medizin, entstammen. Im folgenden Überblick werden sowohl zweidimensionale als auch dreidimensionale Systeme betrachtet. Aufgezeigt wird, dass die Einsatzbereiche dreidimensionaler Visualisierungen in vielen Bereichen bei einer besseren Einschätzung der jeweiligen Situationen zu unterstützen. Zunächst werden Systeme zur Darstellung von Geoinformationen beschrieben und allgemeine Datenvisualisierung betrachtet. Anschließend wird eine

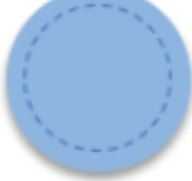
Form	3D Zeichnung	2D Ansicht
Scheibe		
Kugel		
Halbkugel		
Zylinder		
Orientierter Zylinder		
Orientierter angeschnittener Kegel		

Abbildung 2.24: Auswahl Multivariater Ziele nach Stuerzlinger und Teather

generelle Betrachtung von Datenvisualisierungen für die Navigation in maritimen und nicht-maritimen Szenarien vorgenommen.

Die Idee der Verwendung von virtueller Realität und der digitalen Darstellung von geographischen Daten gehen nach Fisher und Unwin (2003) zurück bis in die 1970er Jahre. Eine erfolgreiche Verschmelzung von beidem fand jedoch in den 1990'ern an der Georgia Tech University statt. Von dort an wurde das Potential von virtueller Realität in Verknüpfung mit geographischen Darstellungen fortgehend erforscht. Die Einsatzbereiche waren bereits vielfältig definiert, so wurden Konzepte zu Geographischen Informationssystemen in der Stadt- und Regionsplanung, Umweltplanung und Modellierung, Kartenvisualisierung, Ökologie oder im Rahmen militärischen Trainings diskutiert. Die Fusion von geographischen- mit Sensordaten war damit zu dem Zeitpunkt schon gegeben. Beispielsweise wurde ein System zur räumlichen Darstellung von Radardaten bereits von Göbel, Stallkamp und Springer (1994) konzipiert. Der Einsatz spezialisierter Geoinformationssysteme und somit die Darstellung nautischer Information als digitale nautische Karte ist inzwischen essentieller Bestandteil moderner Schiffsbrücken und Lotsenarbeitsplätzen im On- und Offshore-Bereich. Sie dienen als zentrales Informationsmedium für geographische Umgebungsinformation und bilden sämtliche Sensorik in abstrakter Form ab, die für die Überwachung von Umweltfaktoren menschlichen und natürlichen Ursprungs Einfluss auf die Sicherheit bei der Navigation und bei der Erkennung von Gefahrensituationen haben. Nach Ford (2002) hat zwischen den Jahren 1976 bis 1999 ein stetiger Prozess der Digitalisierung klassischer nautischer Karten stattgefunden. Zu Beginn dieser Zeitspanne entstanden die ersten zweidimensionalen elektronischen Kartenanzeige- und Informationssysteme, oder „electronic chart display and information systems“ (engl.), oder abgekürzt ECDIS.

Die Verwendung von virtueller und erweiterter Realität in Kombination mit naturalistischer Interaktion ist derzeit im Bereich der Visualisierung von Ozeanszenarien Gegenstand aktueller Forschung. Butkiewicz (2012) nutzen einen Multitouch-Tisch zur Interaktion mit dreidimensionalen Visualisierungen von Tiefseeströmungen. Das Interaktionskonzept funktioniert über eine „Pie Menu“-Struktur, über die sich verschiedene Eigenschaften der Visualisierung konfigurieren lassen (vgl. Abbildung 2.26). Das System ist als prototypisches System konzipiert, welches nicht an Bord von Schiffen, sondern in Landszenarien eingesetzt werden kann. In einer aktuelleren

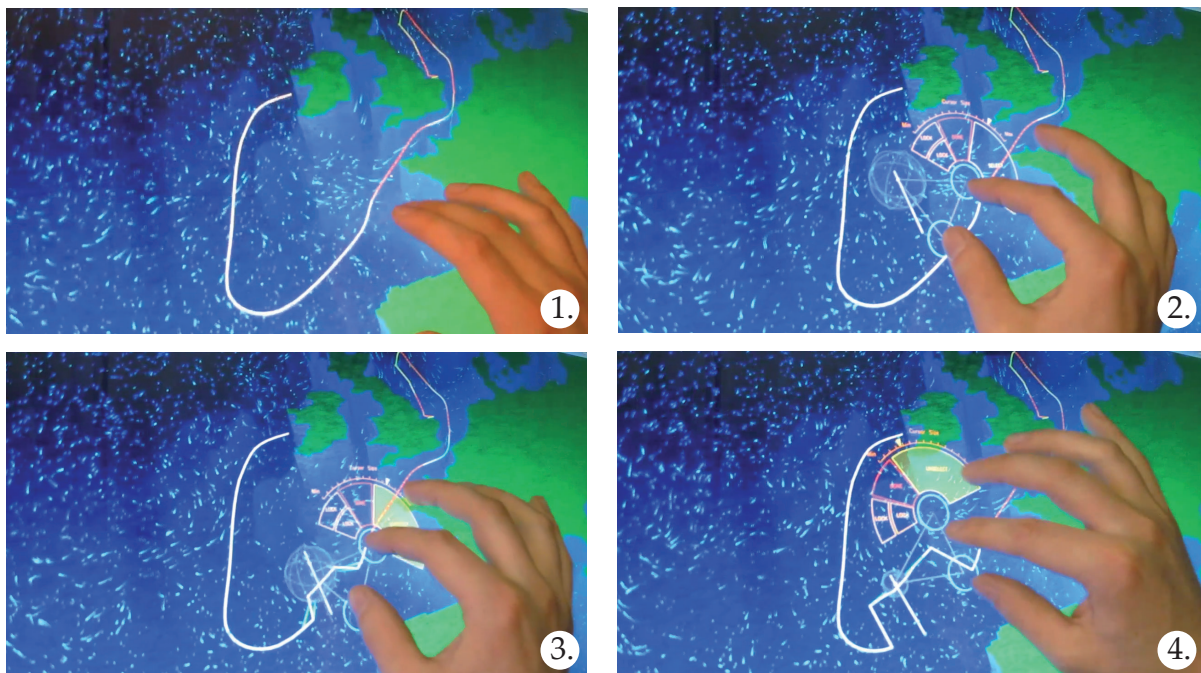


Abbildung 2.25: „Pie Menu“-artiger Interaktionsdialog zur Analyse von Meeresströmungen mit einem berührungsempfindlichen Display (Tbutkie's channel, 2013)

Forschungsarbeit von Butkiewicz (2017) werden die Potenziale von Virtueller und Erweiterter Realität für den Einsatz in Schiffsbrücken diskutiert. Demnach haben besonders Darstellungen in der erweiterten Realität großes Potenzial zur Unterstützung einer sicheren Schifffahrt, die derzeit verfügbaren Geräte sind in ihrer Benutzung jedoch noch recht eingeschränkt, um für den Einsatz auf hoher See tauglich zu sein. Der aktuelle Stand der Technik erlaubt dennoch die Entwicklung prototypischer Systeme. Butkiewicz (2017) beschreibt ein System der erweiterten Realität zur Meeresnavigation, welches in einer voll-immersiven virtuellen Realität umgesetzt ist. Die Umsetzung von Anzeigesystemen der erweiterten Realität kann in der voll-immersiven virtuellen Realität einfach hinzugefügt werden. Auf diese Weise lassen sich neue Szenarien einfach umsetzen und mit verschiedenen Interaktionsmethoden explorieren.

Die stereoskopische Visualisierung räumlicher Datensätze findet in vielen Bereichen der Datenanalyse Anwendung. In der Medizintechnik beispielsweise werden verschiedene Verfahren zur Erstellung von dreidimensionalen Datensätzen eingesetzt. Dreidimensionale Darstellungen unterstützen zum Beispiel in der Diagnostik, wie bei der Lokalisierung von Organen oder von Tumoren. Die Wahl der Anzei-

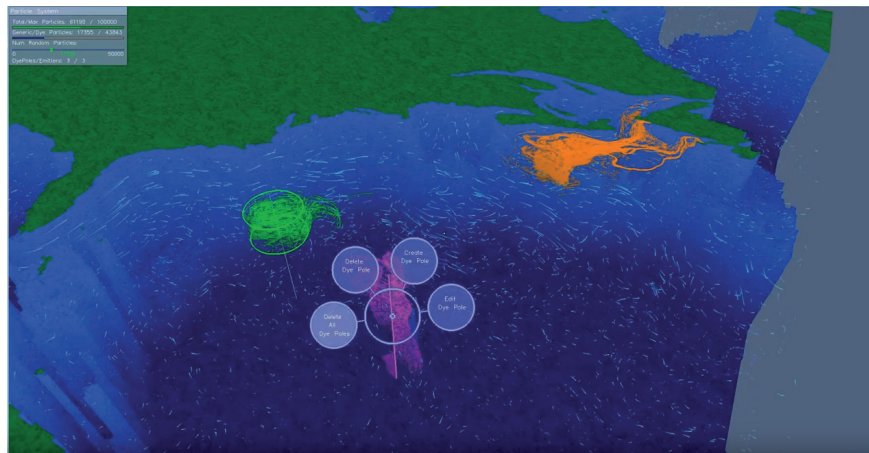


Abbildung 2.26: „Pie Menu“-artiger Interaktionsdialog in einer Multi-Touch-Umgebung zur Modellierung von Meeresströmungen



Abbildung 2.27: Hochaufgelöstes 3D-Bild aus Google Earth des Hauptsitzes der ATLAS ELEKTRONIK GmbH in Bremen³

getechnologien ist hier vom Anwendungsfall abhängig. Da die Möglichkeiten zur Datenerfassung in der Medizin immer vielfältiger werden und auch zunehmend die Möglichkeit zur Erstellung von dreidimensionalen Bilddatensätzen gegeben ist, hat die Darstellung dieser Datensätze in der erweiterten und virtuellen Realität einen immer größeren Mehrwert. Ferrari, Megali, Troia, Pietrabissa und Mosca (2009) verwenden ein Anzeigesystem der erweiterten oder gemischten Realität. Brunner et al. (2014) nutzen ein kommerzielles stereoskopisches Display um Echtzeitdatensätze von Magnet-Resonanz-Scannern anzuzeigen. Die stereoskopisch dargestellten Datensätze helfen behandelnden Ärzten beispielsweise bei der räumlichen Einschätzung für die Platzierung eines Katheters. Dazu wurde ein kommerzielles stereoskopisches Display für die Anzeige der erzeugten Daten verwendet. Ferrari et al. (2009) beschreiben einen ähnlichen Versuchsaufbau, in dem erweiterte Realität über ein kopfbasiertes stereoskopisches Anzeigesystem dreidimensionale Sensordaten eines Magnetresonanztomographen über ein Echtzeitkamerabild darstellt. Das System zeigt zwar die visuellen Daten zwar in Echtzeit an, erlaubt einem Chirurgen jedoch preoperativ erhobene Daten über das Anzeigesystem auf den Körper eines Patienten zu augmentieren. Die Anzeige entspricht nach der Taxonomie von Milgram und Kishino (1994) einer gemischten Realität oder „Mixed Reality“.

Baier und Zimmer (2014) untersuchen in einer Studie die Vorteile verschiedener stereoskopischer Visualisierungen in der Flugverkehrsüberwachung und leiten aus ihren Folgerungen Vorteile für Situationen ab, in denen es zu Mehrdeutigkeiten bei der Interpretation von Objektflughöhen kommt. Die gewonnenen Erkenntnisse weisen auf eine bessere Deutung räumlicher Information hin, wenn diese auch korrekt räumlich wahrnehmbar dargestellt wird. Zu ähnlichen Ergebnissen kommen auch Wittmann et al. (2011) in einer Studie, welche die Eignung von stereoskopischen Anzeigesystemen für die Anzeige von Daten in der Flugsicherung untersucht. In der Studie wurden jeweils einer Gruppe von trainierten Fluglotsen als Experten und einer Gruppe Laien Konfliktsituationen auf nicht-stereoskopischen Systemen sowie stereoskopischen Systemen dargestellt. Für die stereoskopische Visualisierung wurde ein spezieller Arbeitsplatz konzipiert und prototypisch umgesetzt (vgl. Abbildung 2.28). Die Ergebnisse zeigen, dass trainierte Fluglotsen eine konstant hohe Performanz bei der Erkennung von Konflikten aufweisen. Die Laien-Gruppe jedoch erzielte mit der stereoskopischen Visualisierung eine bessere Performanz im Vergleich zur



Abbildung 2.28: Fluglotsenarbeitsplatz mit stereoskopischer Visualisierung und Headtracking zur Anpassung der Perspektive (aus Wittmann et al. (2011))

klassischen Darstellung. Die Laien-Gruppe bevorzugte zudem die stereoskopische Visualisierung, während die Expertengruppe die klassische Ansicht bevorzugte.

Ford führt als Ziel der Entwicklung von dreidimensionalen Darstellungen in der maritimen Navigation die Produktion eines integrierten Echtzeit-Navigationssystems an, in dem verschiedene Daten aus Echtzeitsensoren an Bord, meteorologischen Daten, Tidenströmung und weiteren Datenquellen zusammenfließen und den Navigator dabei unterstützen, Gefahren und Hindernisse frühzeitig zu erkennen und zu meiden. Die direkte Betrachtung eines dreidimensional visualisierten Modells möglicher Gefahren und Hindernisse stellt für den Navigator eine potentielle Erleichterung dar, da nicht erst ein mentales Modell durch die Betrachtung einer zweidimensionalen Seekarte beim Navigator erzeugt werden muss. Stattdessen betrachtet der Navigator

diese Hindernisse direkt in der virtuellen Welt und kann diese einfacher erkennen (Ford, 2002, S. 122 ff.). Durch eine dreidimensionale Darstellung besteht nach Ford außerdem die Möglichkeit zur Reduzierung der schriftlichen Information auf einer elektronischen Seekarte, was zu einer schnelleren Informationsaufnahme beim Betrachter führt (Ford, 2002, S. 129 ff.). Durch den damit verringerten Zeitbedarf bei der Informationsaufnahme kann ein Navigator die freien Ressourcen anderweitig nutzen, beispielsweise um Aufmerksamkeit auf die unmittelbare Umgebung zu richten. Ein ähnliches prototypisches System wurde von Gold, Chau, Dzieszko und Goralski (2005) entwickelt, um die Einfahrt in einen Hafen durch schwieriges Gewässer zu erleichtern. Gold et al. wählten als Szenario die Einfahrt in den Hafen Hong Kongs, welche eine Durchfahrt des Ost-Lamma-Kanals erfordert (vgl. Abbildung 2.29). Mit den bereitgestellten dreidimensional visualisierten Informationen soll ein ortsfremder Navigator einen schnelleren Überblick über befahrbare Einlaufstrecken, Standorte von Bojen, Leuchttürmen und möglichen Hindernissen erhalten, die Planung für die Einfahrt in den Hafen kann dadurch erleichtert werden. Eine dreidimensionale Darstellungen zur Visualisierung maritimer Navigation wurde auch von Ray, Goralski, Claramunt und Gold (2011) als prototypische Anwendung umgesetzt. Der Abstraktionsgrad des dargestellten Materials kann mittlerweile fast beliebig sein, da durch die immer weiter zunehmende Leistungsfähigkeit von Rechnersystemen mehr Details dargestellt werden können. Gleichzeitig steigt die Leistungsfähigkeit von Sensoren, welche die Welt räumlich erfassen. Durch Triangulierung von Radar- und Sonardaten für die Erfassung von Landmassen und dem Meeresboden stehen dem Endverbraucher bereits heute hoch detaillierte dreidimensionale Datensätze zur Verfügung. Kostenlos zur Verfügung gestellt wird solches Material inzwischen beispielsweise von Google Inc. durch den kostenlos vertriebenen Dienst „Earth“ (Zlatanova, Rahman & Pilouk, 2002b). Abbildung 2.27 zeigt den Detailgrad der zur Verfügung gestellten Daten. Die Anzeige der hoch aufgelösten Daten kann mit einem Endgerät der erweiterten und virtuellen Realität kombiniert werden und ermöglicht dem Endnutzer eine Betrachtung eines entfernten Ortes aus der egozentrischen Perspektive. Hugues, Cieutat und Guitton (2010) sehen in neuen Technologien der erweiterten und virtuellen Realität Vorteile für die Analyse großer Datenmengen. Durch kleiner werdende Rechnersysteme und die dadurch immer weitere steigende Portabilität können leistungsfähige Anzeigesysteme auch an Bord von Schiffen eingesetzt werden. Hugues et al. führen dazu drei Hauptmerkmale an, die durch die

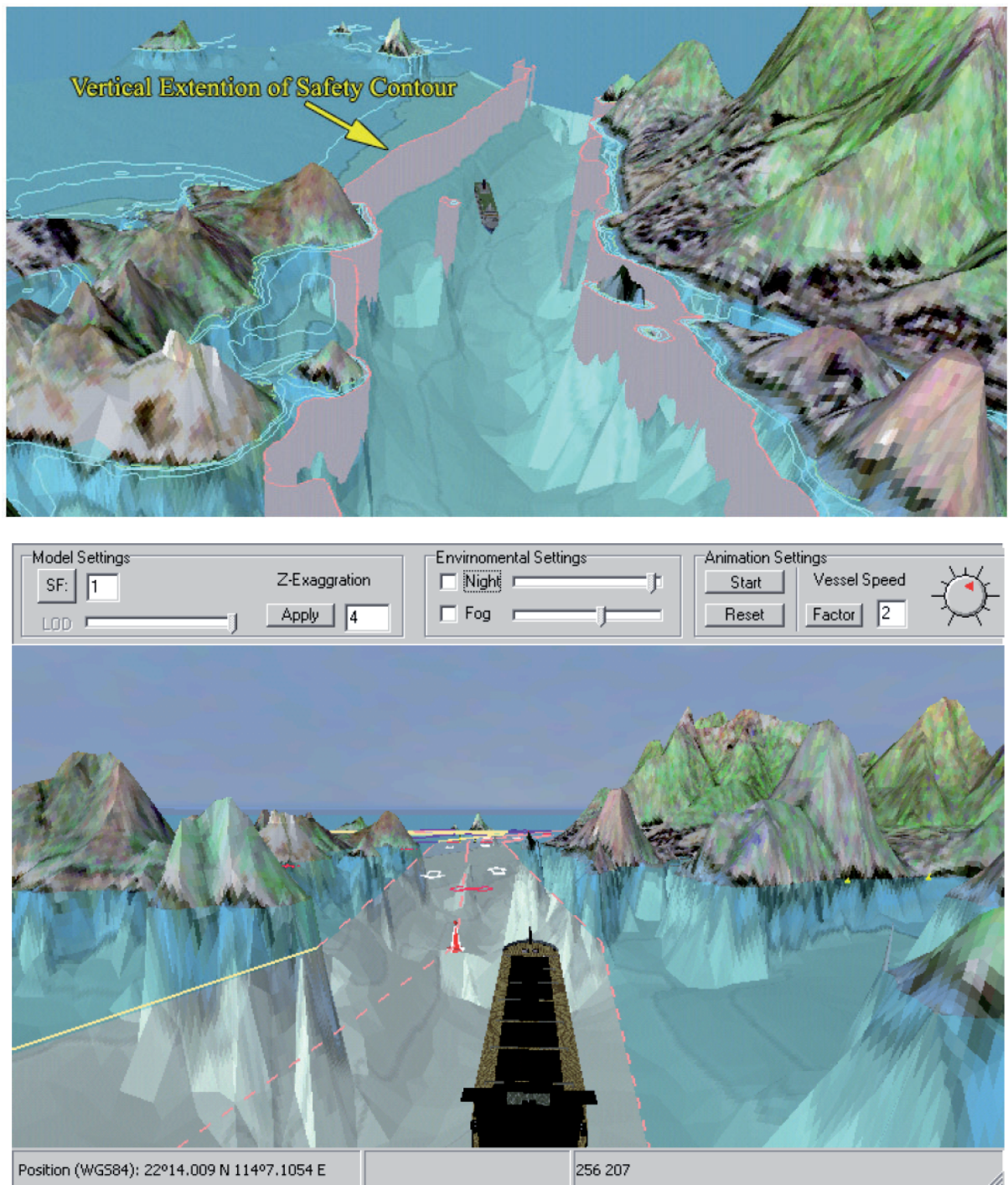


Abbildung 2.29: Dreidimensional visualisierte Einlaufstrecke für die Navigation durch sichere Gewässer mit angezeigter Einlaufstrecke, Bojen, etc. (Gold, Chau, Dziesko & Goralski, 2005)

Digitalisierung von Analysedaten zur Auswertung an Board und durch die Anzeige auf virtuellen und erweiterten Anzeigen verbessert werden können:

- Verbesserte Schutz von Gütern, Fahrzeugen, Umwelt und Menschen
- Steigerung der Produktivität bspw. beim Fischfang oder Abbau von Rohstoffen
- Verbesserte Repräsentation für die Steuerung in der maritimen Umgebung (Orientierung, Position und Fahrtrichtung)

Maritime Geoinformationssysteme entwickelten sich mit der Verfügbarkeit neuer visueller Ausgabesysteme stetig weiter und wurden auch in Bezug auf die Mensch-Maschine-Schnittstelle im Laufe der Weiterentwicklung angepasst. Eine frei verfügbare und quelloffene Software zur Anzeige von dreidimensionalen Geländedaten ist „Nasa World Wind“. Der Quellcode ist als „API“⁴ verfügbar und kann damit einfach erweitert werden. Scott et al. (2010) untersuchen in einer Studie ein maritimes Geoinformationssystem, welches auf einem Tabletopcomputer ausgeführt wird. In einem solchen Setup dient ein großflächiges, tisch-artig aufgestelltes Display als Darstellungs- und Interaktionsfläche, welches von mehreren Personen gleichzeitig betrachtet wird. Das von Scott et al. verwendete Setup ermöglichte es Benutzern, per berührungsempfindlicher Oberfläche Eingaben in das System vorzunehmen. So ließ sich per „Touch“-Interaktion die digitale Seekarte zoomen und translatieren und über eine Dialogstruktur eine Auswahl zur Anzeige bestimmter Daten treffen. Die „Touch“-Interaktion erfolgt über Eingabestifte, eine direkte Eingabe über die Finger der Nutzer konnte nicht vorgenommen werden.

Isenberg et al. (2013) präsentieren die Ergebnisse eines Workshops in einer Studie über interaktive Visualisierungen von Datensätzen auf großen interaktiven Tischbildschirmen, und sehen auch hier Vorteile bei der digitalen Visualisierung von maritimen Geoinformationssystemen. Ray et al. (2011) stellen einen Prototyp für ein dreidimensionales ECDIS System vor. Durch eine Dreidimensionale Darstellung wird nach Ray et al. (2011) das Verständnis des Verhaltens von Schiffen bei der Navigation und der sich durch die vielen auf einer Seekarte vorhandenen Objekte sich ergebenden Muster auf See begünstigt um bessere Entscheidungen für Seeleute oder durch zuständige Seebehörden der Verkehrsüberwachung treffen zu können. Der zeitliche und geistige

⁴API: Akronym für „Application Programming Interface“, engl.: Programmierschnittstelle. Ermöglicht den Zugriff auf Teile einer bereits implementierten Software auf Quelltextebene.

Aufwand, welcher für das Verständnis zweidimensionaler Karten aufgebracht werden muss, wird von Ray et al. (2011) als mögliche schwerwiegende Fehlerquelle in Bereichen eingeschätzt, in denen die Zeit für die Analyse der Situation von entscheidender Bedeutung sein kann. Ray et al. (2011) sehen mögliche Risiken beispielsweise bei der Navigation von Hochgeschwindigkeits-Schiffen, wo sich nicht nur die Situation schnell ändern kann und die verfügbare Reaktionszeit begrenzt sei, sondern auch die Müdigkeit der Navigatoren ihre kognitiven Fähigkeiten einschränken kann. Ray et al. (2011) begründen über diese möglichen Risiken die Bereitstellung für eine möglichst immersive Darstellung auch in der maritimen Navigation über eine dreidimensionale Visualisierung. Die prototypischen Arbeitsergebnisse von Ray et al. (2011) sind in Abbildung 2.30 dargestellt.

Meyer, Bützler, Dzaack und Schlick, 2014b stellen Konzepte zu Einsatzszenarien von dreidimensionalen Geoinformationssystemen vor und gehen dazu auf konkrete Szenarien ein, welche einen Mehrwert für dreidimensionale Visualisierungen von Geoinformationssystemen bieten. Die vorgestellten Ergebnisse liegen Expertengespräche zugrunde und sind Teil der vorliegenden Schrift. Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Expertengespräche näher beschrieben.

2.9 Expertenbefragung

Die Grundlage der praktischen Umsetzung wird durch das Führen von Leitfadeninterviews mit Experten aus dem maritimen Bereich und des User Interface Designs im Über- sowie Unterwasserbereich gelegt. Die Interviews wurden als Leitfadeninterviews geführt (Mayer, 2008), (Mayer, 2012). Alle befragten Experten fuhren entweder selbst über einen längeren Zeitraum zur See oder beschäftigen sich in ihrer täglichen Arbeit mit der Gestaltung von Mensch-Maschine-Schnittstellen von Über- und Unterwasserfahrzeugen. Als Gestaltungshilfe der Leitfadeninterviews wurde ein Leitfaden nach Mayer (2008) gestaltet, in dem Thematisierungen und kategorische Vorgaben bereits die Struktur des Interviews vorgeben. Kennzeichnend für das Leitfadeninterview mit Experten ist die Zugrundelegung von offen formulierten Fragen, die während des Interviews als Unterstützung dienen und auf die der Befragte frei antworten kann. Der verwendete Leitfaden ist im Literaturanhang aufgelistet.

Die Verwendung eines Leitfadens erhöht bei einer größeren Zahl von Interviewpart-

2. Grundlagen

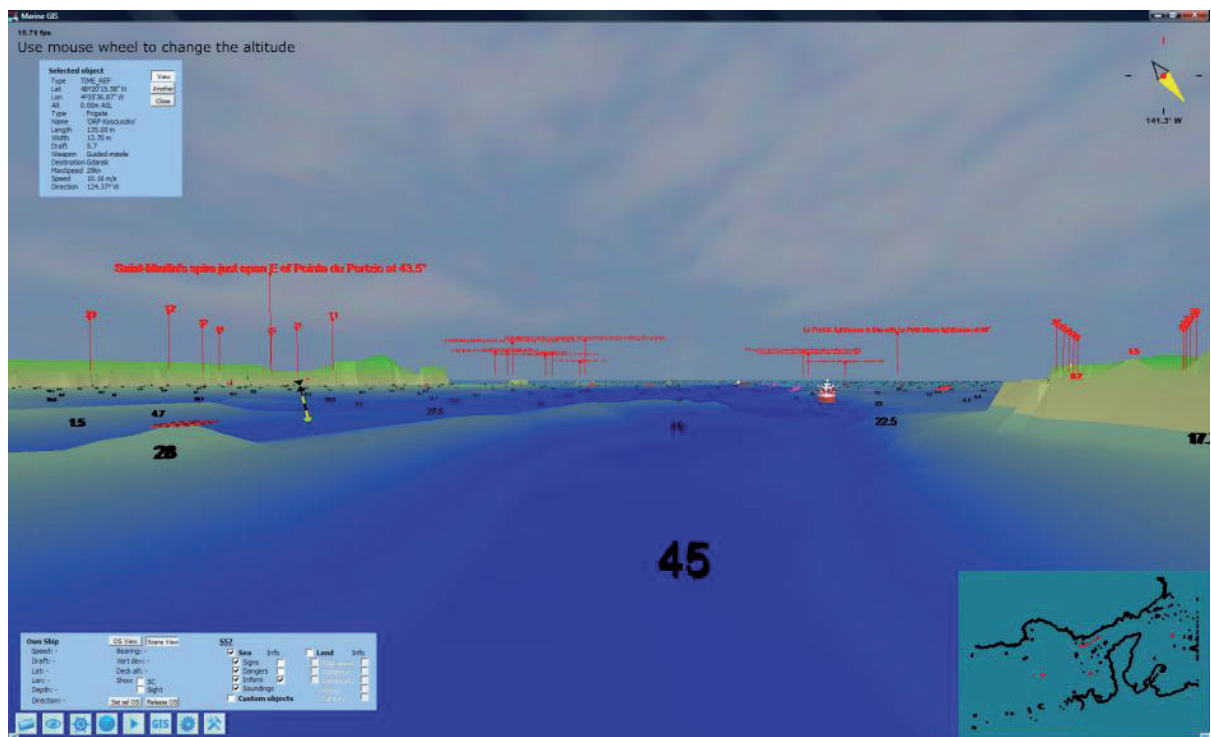
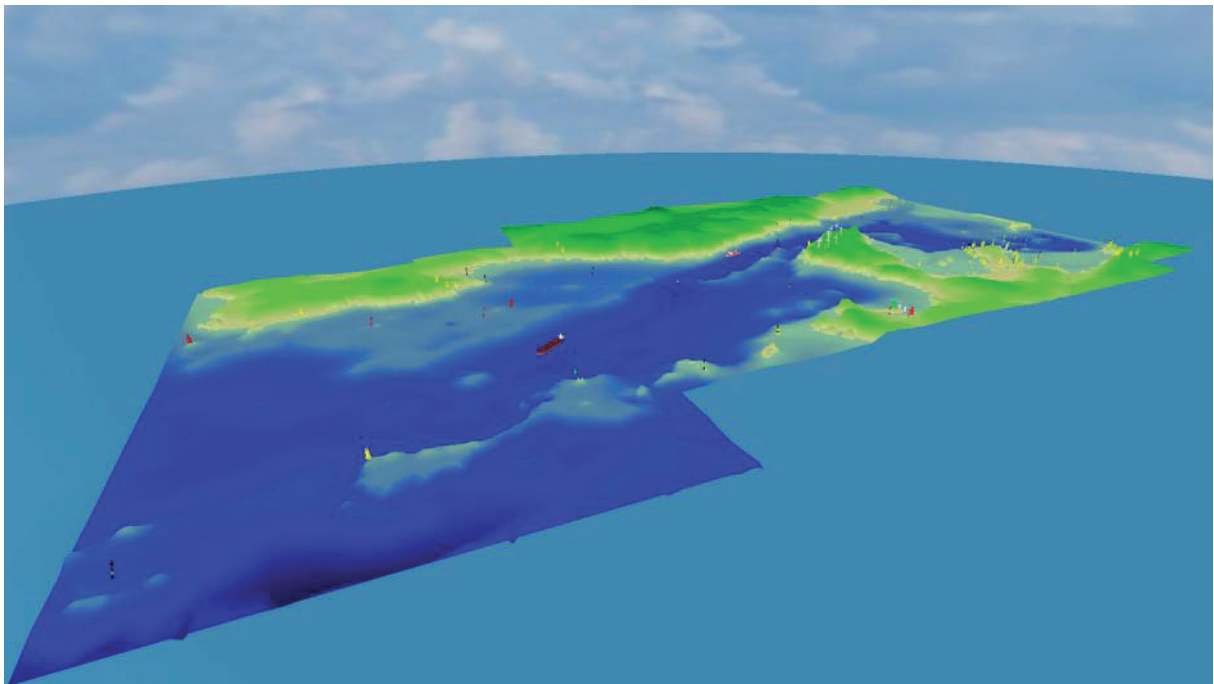


Abbildung 2.30: Dreidimensionale Visualisierung von einem maritimen Einlaufszenario von Ray, Goralski, Claramunt und Gold (2011)

nern die Vergleichbarkeit der erhobenen Daten und dient gleichermaßen als Struktur. Gleichzeitig lässt das Leitfadeninterview dem Interviewer genügend Spielraum, um bei bestimmten Fragestellungen mehr ins Detail zu gehen oder den Interviewten auf bestimmte Fragen ausschweifender antworten zu lassen (Mayer, 2008). Die Experteninterviews wurden jeweils mit der Hauptfragestellung „Erweiterte und Virtuelle Realität und neue Mensch-Computer-Interaktion mit maritimen Navigations- und Einsatzsystemen“ eingeleitet.

Da den eingebundenen Experten Thema und Anwendungsgebiet in der Domäne der Maritimen Sicherheit und der Systemgestaltung als Experten hinreichend bekannt waren und konkrete Aussagen über das angegebene Thema von den Experten getroffen werden sollen, wird das Experteninterview nach der Methode von Mayer (2008, S. 37 ff.) als ökonomischere Variante gegenüber dem narrativen Interview gewählt. Alle befragten Experten haben langjähriges Wissen im Umgang und der Erstellung mit maritimen Lagedarstellungen und sind direkt oder indirekt an der Gestaltung von Mensch-Maschine-Systemen beteiligt. Da bei der Gestaltung eines Leitfadens für ein Experteninterview keine zu konkrete Fragestellung angestrebt werden sollte, wird der Leitfaden aus einer Sammlung an Themenfeldern passend zum Hauptthema erstellt und mit möglichst offenen Fragen versehen. Diese Themenfelder wurden des weiteren mit Schlagwörtern angereichert, um den Experten, sofern notwendig, Denkanstöße zu der gegebenen Problemstellung zu geben. Vor der Durchführung der Interviews wurde ein Pretest zur Überprüfung der Formulierungen mit einer unabhängigen Person durchgeführt. Die Ergebnisse wurden während des Interviews schriftlich dokumentiert. Alle Befragten hatten zum Zeitpunkt des Interviews bereits Erfahrungen mit Touch-gestischer Interaktion in zweidimensional dargestellten Geoinformationssystemen.

Der Interviewleitfaden war thematisch in die drei Kategorien „Stereoskopische Visualisierung“, „Interaktion“ und „Szenario-basierte Anwendung“ gegliedert. Die Kategorien eins und zwei erörterten inhaltlich den Kenntnisstand der Experten zu den entsprechenden Themen und schaffte eine Grundlage zu den anstehenden Themen in Kategorie drei. Kategorie drei wurde mit einem kurzen Videoausschnitt aus dem Kinofilm „Iron Man 2“ eingeleitet, in dem ein Nutzer ein raumgroßes, holographisch dargestelltes, multimodales Interaktionssystem per Sprachbefehl sowie per Handgesten steuert. Das System steht dabei zu jeder Zeit in Kontakt mit dem Nutzer und reagiert per Handgesten nur auf Eingaben, sofern der Nutzer dies

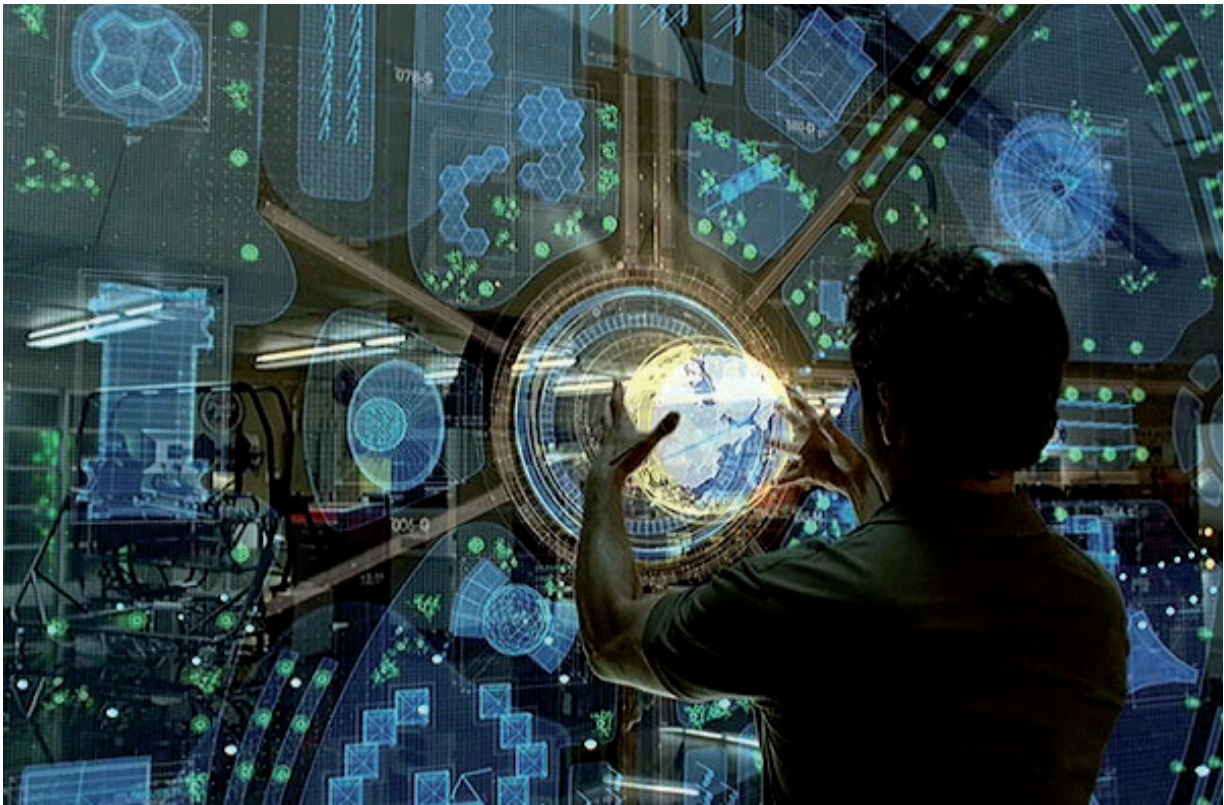


Abbildung 2.31: Hauptdarsteller aus „Iron Man 2“ interagiert intuitiv mit dreidimensionalem Hologramm (aus Favreau, Djawadi und Fergus (2010))

auch ausdrücklich erwünscht. Mit einzelnen Fingern werden über Gesten Bestimmte Ausschnitte des Hologramms vergrößert und verkleinert, oder farblich und über ihre Intensität gegenüber anderen Teilen des Hologramms hervorgehoben. Alles geschieht intuitiv und beidhändig, als würde der Nutzer mit realen Gegenständen interagieren. Dabei greift er nach Belieben in das Hologramm hinein und erzeugt in Echtzeit Interaktionsdialoge, die zur Manipulation der angezeigten Daten verwendet werden (vgl. Abbildung 2.31). Die Wahl des hier beschriebenen Filmausschnittes wurde deswegen gewählt, da hier repräsentativ gezeigt wird, was unter dem Begriff der „naturalistischen Interaktion“ verstanden wird. Fiktionale Vorlagen für die Interaktion in virtuellen Welten aus Literatur und Film zur Gestaltung natürlicher Benutzungsschnittstellen werden häufig herangezogen (Bowman, 2005, S. 16 FF.) und dienen auch hier den Experten als Inspiration und Erweiterung ihres Vorstellungsvermögens. Die Experten erörterten im Rahmen des Interviews ihre Präferenzen für Anwendungsmöglichkeiten neuartiger Darstellungsmöglichkeiten und Interaktion,

die in den genannten Bereichen als bereichernd oder arbeitserleichternd empfunden werden kann. Demnach ist gerade bei Überwachungsaufgaben eine dreidimensionale Visualisierung mit zusätzlichen Tiefenhinweisen wie stereoskopischer Darstellung und eine multimodale Interaktion theoretisch von Vorteil. Ob auch praktische Vorteile gegeben sind, wird in der wissenschaftlichen Literatur überwiegend bestätigt. Die Auswertung der Leitfadeninterviews bildet die Grundlage der Gestaltung des prototypischen interaktiven Systems. Informationsverarbeitung in der maritimen Navigation besteht nach Meyer, Bützler et al. (2014b) zum größten Teil aus der Interaktion mit elektronischen Seekarten und der Steuerung von Geoinformationssystemen. Entsprechende Systeme werden nach Meyer, Bützler et al. (2014b) sowohl an Bord von Wasserfahrzeugen genutzt, als auch an Land, um eine Interaktion mit visualisierten Lageinformationen zu ermöglichen. Geoinformationssysteme stellen ein mächtiges Werkzeug zur Darstellung von dreidimensionalen Informationen dar (Meyer, Bützler et al., 2014b), deren Anwendung im maritimen sowie nicht-maritimen Bereich als Werkzeug besonders wichtig ist. Kommerzielle Geoinformationssysteme nutzen heute größtenteils eine zwei- oder zweieinhalbdimensionale Draufsicht zur Informationsdarstellung. Zur Entwicklung von Benutzungskonzepten zur berührungslosen Interaktion mit Geoinformationssystemen wurden die Experten nach dem erstellten Leitfaden befragt. Hierzu wurden über den Leitfaden zielführend mögliche Anwendungsfälle erörtert. Aus den Ergebnissen der Leitfadeninterviews wurden drei Anwendungsfälle abgeleitet (aus Meyer, Bützler et al. (2014b)). Für diese Anwendungsfälle muss stets eine zuverlässige und robuste Interaktionsmöglichkeit mit den zur Verfügung stehenden Daten jederzeit gewährleistet sein. Durch die Vielzahl der zur Verfügung stehenden Sensoren und Akteure in den von Meyer, Bützler et al. (2014b) diskutierten Szenarien lassen sich komplexe Anwendungsfälle erstellen, durch die sich berührungslose Benutzungs- und Interaktionskonzepte in Geoinformationssystemen auf ihre Anwendung und Robustheit hin untersuchen lassen. Die kontextbezogenen Analysen der Experteninterviews dienen als Grundlage für die Erstellung des zu dieser Arbeit als Grundlage gelegten Prototypen. Im folgenden sind die durch die Experteninterviews abgeleiteten Szenarien im Detail beschrieben, welche thematisch im Unterwasserbereich und Überwasserbereich angesiedelt sind. Anschließend werden konkrete Nutzungsszenarien beschrieben, welche aus den Experteninterviews abgeleitet wurden, und für welche die Experten eine dreidimensionale Visualisierung für nützlich hielten.

2.9.1 Unterwasserbereich

Eine dreidimensionale Darstellung wird im Unterwasserbereich für die Nutzung zur Seefahrtsvorbereitung vorgeschlagen. Da Unterwasserfahrzeuge häufig flache Gewässer durchfahren müssen, wird eine dreidimensionale Darstellung von Höhen- und Tiefen als sinnvoll empfunden, besonders wenn es darum geht, ein besseres Gefühl für die Umgebung zu bekommen. Experten schlagen eine Darstellung auf einem Plottisch vor, auf dem auch Information über die Bodenstruktur angezeigt wird. Unterwasserfahrzeuge werden in der Regel für Aufklärungsmissionen eingesetzt und müssen dabei möglichst unentdeckt bleiben. Die dreidimensionale Visualisierung der Sicherheitstiefe eines Unterwasserfahrzeuges kann dabei für den Navigator an Bord hilfreich sein. Weiterführende Ideen sind eine Visualisierung von Gräben, in die das Unterwasserfahrzeug eintauchen kann, um den gleichen Effekt zu erzielen. Eine stereoskopische oder holographische Visualisierung wird hierbei als Vorteil empfunden, da der Sehwinkel auf das interaktive System intuitiv mit den in einem Unterwasserfahrzeug verbauten Sensoren einhergeht. Die Verwendung von an Bord befindlichen Sensoren ist stark beeinflusst durch Faktoren wie Wasserdichte, Salzgehalt und Temperatur. Da die Sichtbarkeit des eigenen Unterwasserfahrzeuges durch die Sensorik anderer Unterwasserfahrzeuge ebenfalls abhängig ist, ist eine Visualisierung dieser Faktoren in einer dreidimensional dargestellten, virtuellen Welt sinnvoll. Auf diese Art kann ein Betrachter besser verstehen, auf welcher Position das eigene Fahrzeug platziert werden muss, um durch die gegebenen Faktoren unsichtbar für Fremdsensoren zu bleiben. Entsprechende Daten müssen nicht zwangsläufig durch die eigenen Sensoren gesammelt werden, sondern können auch durch das Aussenden eines autonomen Unterwasserfahrzeuges (AUV) gesammelt und an einen Empfänger im Unterwasserfahrzeug zurückgesendet werden.

Die dreidimensionale Visualisierung von Umgebungszuständen und -variablen kann laut Experten zu einem sichereren Einsatz führen, beispielsweise bei der Visualisierung eines Kontaktes, beispielsweise bei einem terroristischen Angriff auf wichtige Infrastrukturelemente. Allerdings ist dabei unbedingt eine maßstabsgetreue Darstellung umzusetzen, da etwaige Informationen auch zu Fehleinschätzungen führen können. Da im Unterwasserbereich die Möglichkeit eines permanenten Kontaktes zwischen Einsatzzentrale und Sensoren besteht, und eine Möglichkeit des Datenaustausches besteht, können diese Daten ebenfalls in einer virtuellen Darstellung

angezeigt werden. Eine Nutzung dreidimensionaler Darstellungen ist aus Sicht der Experten für das Missionsbriefing im Unterwasserbereich eine sinnvolle Ergänzung. Darüber hinaus erhoffen sich die Experten von einer dreidimensionalen Darstellung möglicher Kontakte oder Verbandsmitglieder einen Mehrwert. Der aktuell verwendete NATO Standardsymbolik MIL-SYM-2525 sollte und kann in einer dreidimensionalen Umgebung laut Experten eingesetzt werden.

2.9.2 Überwasserbereich

Der Einsatz von dreidimensionalen Darstellungen wird von den Experten für den Überwasserbereich als weniger wichtig empfunden, da sich Überwasserfahrzeuge überwiegend in Gewässern aufhalten und die Darstellung von Unterwasserprofilen sowie Landmassen als nicht relevant gesehen wird. Die Experten sehen jedoch einen Mehrwert bei der Darstellung von Küstenregionen, da hier die Darstellung von Landmassen eine wichtige Rolle spielt. So könnte eine dreidimensionale Visualisierung im Küstenbereich beispielsweise einen besseren Überblick über unübersichtliche Situationen liefern und Hinweise auf Sensorreichweiten oder der Sichtbarkeit von möglichen Gefahren liefern. In sogenannten „Bluewater“-Szenarien, also Szenarien ohne umliegende Landmassen, ist die dreidimensionale Visualisierung gegenüber der zweidimensionalen Visualisierung dagegen nicht sinnvoll. Selbst Luftfahrzeuge erreichen eine maximale Flughöhe von nur acht bis zehn Kilometern. Auch hier wird eine maßstabsgetreue Darstellung von den Experten als nicht sinnvoll eingeschätzt. Da beim Fahren in großen Verbänden permanent Funkkontakt bestehen soll, ist die volumetrische Anzeige von Frequenzreichweiten eine Möglichkeit, die Navigation in Verbänden zu vereinfachen. Eine Positionsangabe von in einem Verband mitfahrenden Unterwasserfahrzeugen ist laut Experten nicht präzise wiederzugeben. Da nur eine Positionsschätzung möglich ist, kann alternativ mit einem wahrscheinlichen Aufenthaltsvolumen gearbeitet werden. Die Verschmelzung des Aufenthaltsvolumens mit weiteren räumlichen Datensätzen wird von den befragten Experten für die Verbandsfahrt als Vorteil gewertet.

2.9.3 HMI der Zukunft

In der dritten Kategorie wurde der Interviewte angehalten, den durch das Video gewonnenen Eindruck einer futuristischen Mensch-Maschine-Schnittstelle Anwendungsfälle für die in Kategorie eins und zwei erörterten Szenarien zu generieren. Dem Interviewten wurde dazu der Hinweis gegeben, dass die generierten Ideen sich nicht unbedingt auf sein eigenes technisches Vorstellungsvermögen begrenzen müssen, wenn es um die Umsetzbarkeit einer Idee geht. Es wurden Szenarien genannt, die in der Seeschifffahrt für den Ober- und für den Unterwasserbereich relevant sind. Die Experten wurden zur Ideengenerierung für die zukünftige Richtung von Mensch-Maschine-Schnittstellen mit einem kurzen Videoclip motiviert. Der Einsatz von holographischen Anzeigen ist aus Sicht der Experten vielfältig nutzbar. In Katastrophenszenarien sehen die Experten die Möglichkeit der räumlichen Anzeige von Schäden, die an einem Schiff entstanden sind und durch bessere räumliche Einschätzungen schneller von Bordmechanikern behoben werden könnten. Eine realistische Visualisierung von Fluchtwegen oder Zugangswegen zur Brandbekämpfung unterstützt beispielsweise in unübersichtlichen Situationen. Auch die Bekämpfung von Lecks im Schiffsrumpf ist für die Experten thematisch für eine räumliche Visualisierung sinnvoll, da der Einsatz von Personal besser und vor allem sicherer koordiniert werden kann. Bei eventuellen Schäden und deren Registrierung ist eine Visualisierung von Ersatzteilen wünschenswert, die für die entsprechende Reparatur benötigt wird. Diese Gesamtdarstellung des Wasserfahrzeuges kann auch eine Darstellung aller an Bord befindlichen Sensoren beinhalten, die nach Bedarf an- und ausgeschaltet werden können. Da die aktuell angewendete Symbolik der NATO MIL-SYM-2525 eine wichtige Rolle zur Klassifikation von Fahrzeugen und Kontakten spielt, sollte diese in jedem Fall als Grundlage zur Anzeige von Information in einer räumlichen Darstellung verwendet werden, auch wenn diese bisher in noch keiner offiziellen dreidimensionalen Form vorliegen. Zusätzlich dazu kann eine verallgemeinernde, dreidimensionale Symbolik in Form von stellvertretenden dreidimensionalen Objekten verwendet werden um das obligatorische NATO MIL-SYM-2525-Symbol dem dreidimensionalen Objekt hinzuzufügen, beispielsweise in Flaggenform.

2.9.4 Anwendungsfälle

Aus den Ergebnissen der Leitfadeninterviews werden die verschiedenen Einsatzmöglichkeiten eines dreidimensional dargestellten Geoinformationssystems aus Sicht der Experten zusammengefasst. Nach Meinung der Experten entsteht durch eine dreidimensionale Visualisierung ein Mehrwert für Anwendungsfälle maritimer Geoinformationssysteme, die sich konkret in drei Einsatzbereiche kategorisieren lassen (Meyer, Bützler, Dzaack & Schlick, 2014a), (Meyer, Bützler et al., 2014a). Eine vollständige Auflistung der aus den Experteninterviews hervorgegangenen Einsatzmöglichkeiten befindet sich im Anhang (siehe Kapitel 6) dieser Arbeit. Es folgt eine Zusammenfassung der am häufigsten und ausführlichsten genannten Themengebiete.

Anwendungsfall Hafen, Onshore „Der Schutz und die Überwachung von Seehäfen erfolgt in der Regel über eine Einsatzzentrale, in der Sensordaten und die Kommunikation zusammenfließen und ausgewertet werden. Neben der Koordination von Schiffen und Hafenpersonal werden auch Daten zur Inspektion von Hafenanlagen und Schiffsrümpfen erhoben sowie Bilder von Überwachungskameras gesichtet. Eine interaktive dreidimensionale Lagedarstellung mit einem schnellen Zugriff auf die Vielzahl von Sensoren und Daten könnte als zentrales Darstellungselement zur Bewältigung der hohen Informationsdichte eingesetzt werden. Neben der Darstellung von Sensordaten wird auch eine Manipulation von Sensoren als unterstützend erachtet, beispielsweise die Ausrichtung oder die Veränderung von Sichtbereichen einer Kamera.“ (vgl. Meyer, Bützler et al. (2014a))

Windpark, Offshore „Zum Schutz und für die Wartung der Infrastruktur eines Offshore-Windparks kommen verschiedene Sensoren zum Einsatz. Echolote und Unterwasserkameras werden z. B. zur Prüfung von Unterseekabeln und Fundamenten von Windrädern eingesetzt. Die Darstellung der Ergebnisdaten entsprechender Prüfungen in einer interaktiven 3D-Lagekarte wird als gutes Werkzeug zur Unterstützung der Koordination von Wartungsarbeiten gesehen. Da die Koordination und Steuerung der entsprechenden Sensoren auf Hoher See vorgenommen wird, wird der Einsatz berührungsloser Interaktionsmöglichkeiten jedoch als schwierig einzusetzen eingeschätzt.“ (vgl. Meyer, Bützler et al. (2014a))

Bathymetrie und Rohstoffsuche, Offshore und Hohe See „Bathymetrische Karten, also sonographische Aufnahmen des Meeresbodens werden per Echolot erzeugt. Aus dem Datenmaterial lassen sich dreidimensionale Höhenkarten des Meeresbodens erzeugen. Nach Expertenmeinung ist eine Integration in eine 3D-Lagedarstellung sinnvoll, um kombinierte Ansichten von Seekartenmaterial und Bodenprofil zur geographischen Lokalisation von Bodenschätzen sowie für die Navigation in Flachwasser zu erstellen. Der Einsatz von touch-gestischen oder berührungslosen Schnittstellen wird von den Experten jedoch skeptisch betrachtet, da eine technische Realisierung solcher Schnittstellen noch keine der im maritimen Einsatzfeld erforderlichen Robustheit biete.“ (vgl. Meyer, Bützler et al. (2014a))

3. Entwicklung eines interaktiven stereoskopischen Systems zur Datenanzeige

Im folgenden Kapitel werden Systemdesign und Entwicklung des prototypischen Systems erläutert. Auf Basis der wissenschaftlichen Literatur aus Kapitel 2 und den Experteninterviews wird ein Systemkonzept entwickelt und eine Softwarearchitektur erstellt, anschließend wird eine Auswahl der zu verwendenden Eingabe- und Ausgabehardware getroffen. Des weiteren wird auf das angewendete partizipative Konzept eingegangen, welches über die Systementwicklung bis hin zum Prototyp der für die Versuchsphase verwendeten Software angewendet wurde. Die hier dargelegten Inhalte sind unter anderem Teil der bereits vorveröffentlichten Teilergebnisse gemäß der zu Beginn der Schrift aufgezählten Beiträge.

Als Strukturvorgabe für die Entwicklung des prototypischen Systems wird für den Teil der Softwareentwicklung nach dem V-Modell vorgegangen. Das V-Modell hat sich als solide Entwicklungsrichtlinie in der Softwareentwicklung etabliert und berücksichtigt eine iterative Vorgehensweise. Im V-Modell können sowohl die Entwicklung des Hauptsystems als auch die Entwicklung von Unterstützungssystemen berücksichtigt werden. Die Zielgruppe und der Abnehmer (Kunde) waren in die Entwicklung des prototypischen Systems mit eingebunden und haben in der Entwicklungsphase Einfluss auf weitere Funktionalitäten der Software Einfluss genommen.

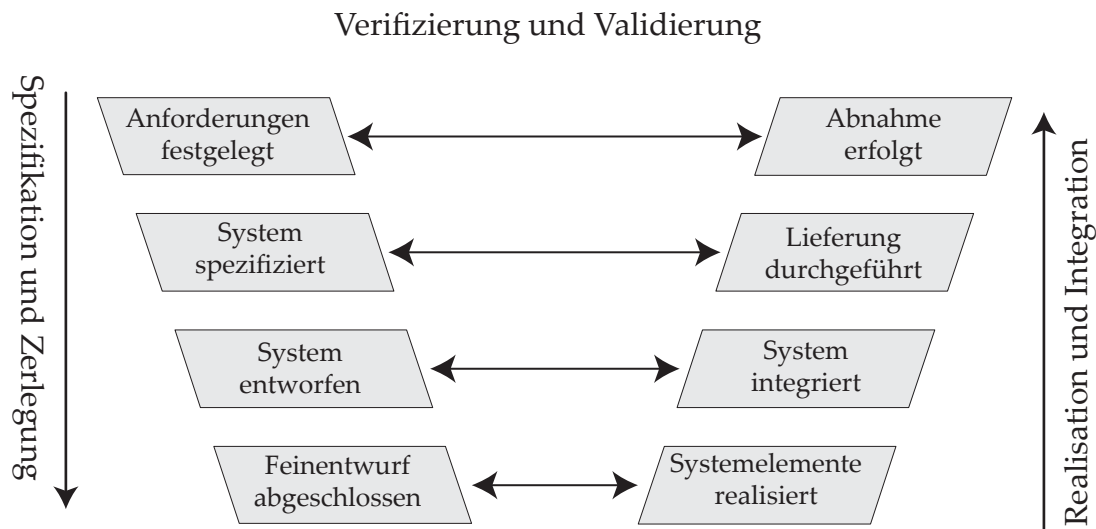


Abbildung 3.1: V-Modell XT nach Broy und Rausch (2005)

3.1 Iterativ-Partizipative Vorgehensweise

Für die Umsetzung des Systems wurde eine iterativ-partizipative Vorgehensweise gewählt. Ein Großteil der Softwareentwicklung konnte im Hause des Industriepartners stattfinden, wodurch die Möglichkeit gegeben war, das System in regelmäßigen Abständen einer Gruppe von internationalen Experten in Form eines sogenannten „Peergroup-Treffens“ aus dem Unter- und Oberwasserbereich vorzustellen. Die Vorstellung des aktuellen Standes erfolgte mehrfach während der Entwicklungsphase innerhalb der Gruppe und lief immer nach gleichem Schema ab. In einer ersten Phase wurde den Experten der aktuelle Stand des Systems Form einer Folienpräsentation präsentiert. In einer zweiten Phase konnten die Experten den aktuellen Stand des Systems praktisch nutzen. Das von den Experten wiedergegebene Feedback aus der anschließenden Diskussionsrunde wurde stichpunktartig festgehalten und für die nächste Iterationsstufe in den Prototyp eingearbeitet. Insgesamt wurden der Expertengruppe drei Zwischenstände der prototypischen Software zum Testen vorgeführt und die Iteration über drei Stufen vorgenommen.

3.2 Anforderungen

Aus den Experteninterviews werden Anforderungen für die Implementierung der Funktionen der maritimen Lagedarstellung abgeleitet. Eine ausführliche Auflistung gewünschter Funktionen aus Sicht der Experten und des Kunden ist an diese Schrift angehängt. Das entwickelte Gesamtkonzept für das prototypische System berücksichtigt eine mögliche Integration des Arbeitsplatzes als Konsole auch in Fahrzeugen, in denen aufgrund der Bauart Platz gespart werden muss. Dies ist notwendig, da im Konzept der einen Einsatz auf kleinen Unterwasserfahrzeugen oder kleinen Schiffen berücksichtigt wird.

3.3 Software-Rahmenwerk

Das Software-Rahmenwerk wird teilweise aus Middleware-Komponenten zusammengestellt (Emmerich, 2000; Mascolo, 2005) und teilweise um eigene Softwarekomponenten erweitert. Die Auswahl der eingesetzten Middleware erfolgt durch die sich aus den Expertengesprächen ergebenden Anforderungen an die stereoskopische Seekarte. Als zentrale Middleware zur Erstellung des Software-Rahmenwerkes wird Open Inventor von der Firma FEI/VSG für die .NET-Plattform verwendet. Durch die Festlegung auf die .NET-Plattform ist das prototypische System zwar nicht plattformübergreifend einsetzbar, jedoch kann so an bereits vorhandene Softwarelösungen angeknüpft werden. Die Klassifikations- und Positionsbestimmungen vom Schiff- und Luftverkehr werden von zentral verwalteten Diensten über das Internet bereitgestellt und können über Schnittstellen in Lagedarstellungen mit Kartenmaterial und anderen Daten zusammengefügt werden. Jedes am Marineverkehr teilnehmende Fahrzeug ist verpflichtet, Positions- und Metadaten, sogenannte AIS-Daten (AIS: Automated Information System), per Funk an die Umgebung und an eine zentrale Datenbank zu senden. Damit steht ein Onlinedienst zur Verfügung, der zur Überwachung des maritimen Schiffsverkehrs genutzt werden kann und permanent aktualisierte Daten zur Verfügung stellt ¹ und zur Steigerung des Situationsbewusstseins eines Navigators beiträgt (Lane, Nevell, Hayward & Beaney, 2010), (Pallotta, Vespe & Bryan, 2013b), (Pallotta, Vespe & Bryan, 2013a). Dieser Onlinedienst ist im Konzept für den in dieser Arbeit geplanten Prototyp berücksichtigt und wird als Informationsquelle genutzt.

¹www.marinetraffic.com

Für die Darstellung der „AIS Livedaten“ wurde im Rahmen eines parallel laufenden Projektes des Industriepartners bereits eine Schnittstelle zur Bereitstellung der Daten implementiert und wird als „COTS“-Komponente in den Prototyp übernommen.

3.4 Systemkonzeption

Dreidimensionale Umsetzungen geographischer Informationssysteme finden inzwischen Anwendung auf Desktopcomputersystemen. Gröger und Plümer (2012) sowie Zlatanova, Rahman und Pilouk (2002a) listen eine Reihe von Anwendungsfällen für ein dreidimensional visualisiertes Geoinformationssystem auf. Darunter sind Systeme zur Landschaftsplanung, Stadt- und Telekommunikationsinfrastrukturplanung, hydrographischen Vermessung sowie Informationssysteme für das Katastrophenmanagement. Allerdings haben diese Systeme bislang keine praktische Relevanz für kommerzielle Produktivsysteme. Die Paradigmen zur Mensch-Computer-Interaktion befinden sich aufgrund neuer Technologien und Techniken für die Interaktion im Umbruch. Dabei ist ein Trend zur naturalistischen Mensch-Computer-Interaktion zu beobachten. Nach Bowman (2005) bietet diese intuitivere Charakteristiken als klassische Mensch-Computer-Interaktion z.B. über Maus und Tastatur. Eigenschaften virtueller Umgebungen lassen sich nach Bowman (2005) nutzen, um die Interaktion zwischen Benutzer und virtueller Umgebung direkter zu gestalten z.B. durch die Erhöhung der Präsenz (engl. „presence“) des Benutzers in der virtuellen Umgebung und der damit verbundenen Verringerung der kognitiven Distanz (engl. cognitive distance), die sich durch die Möglichkeit der direkten Interaktion mit Entitäten in der virtuellen Welt ergeben (vgl. Meyer, Bützler et al. (2014a)). Die klassische Benutzerinteraktion mit geographischen Informationssystemen ist in kommerziellen Systemen zumeist an die Benutzung mit Maus und Tastatur gebunden. Für die Interaktion mit zweidimensional dargestellten Systemen sind Maus und Tastatur als Interaktionsmedium ausreichend, da die Steuerung der ebenen Lagedarstellung den translatorischen Freiheitsgraden der Maus entspricht. Zur Navigation im dreidimensionalen virtuellen Raum und zur Manipulation spatialer Objekte (z.B. Manipulationsobjekte wie Schiffe, Landstation oder Seegebiete) in einer dreidimensionalen Visualisierung sind neue Benutzungskonzepte erforderlich, da diese Art der Mensch-Computer-Interaktion neue Freiheitsgrade ermöglicht.

Die in Kapitel 2 dargelegten Grundlagen für die Beschreibung und Entwicklung von Geoinformationssystemen werden bei der Erstellung eines Prototyps einer Stereoskopischen Maritimen Lagedarstellung berücksichtigt. Besonders im Fokus steht dabei die Visualisierung von Unterwasserdaten in der Dreidimensionalität, da der Bedarf an entsprechender Visualisierung dreidimensionaler Information seit geraumer Zeit zunimmt (Zlatanova et al., 2002a). Geoinformationssysteme mit zweidimensionaler Draufsicht wurden nach Yu, Sun, Peng und Zhang (2012) in einer Vielzahl von Anwendungsdomänen wie der Stadtentwicklung, Landschaftsgestaltung, Planung in der Landwirtschaft oder für die Planung militärischer Operationen genutzt (Yu et al., 2012). Durch die Beschränkung der Ansicht auf zwei Dimensionen werden die Ansprüche vieler Nutzer jedoch nicht erfüllt, besonders dann, wenn Nicht-Experten eine Analyse auf Basis zur Verfügung gestellter Daten treffen sollen. Der Informationsaustausch zwischen Expertengruppe und Nicht-Expertengruppe in Bezug auf geographische Daten wird in der Literatur als schwierig beschrieben, da geographische Daten häufig stark abstrahiert dargestellt werden und von Nicht-Experten nur schwer zu lesen sind. Um dieses Problem zu umgehen, werden für die Nicht-Experten zur besseren Vorstellung häufig zusätzliche 3D-Visualisierungen angefertigt. Die direkte Verarbeitung bzw. Erstellung von dreidimensionalen Daten im GIS-Werkzeug wird dagegen seltener praktiziert. Zlatanova et al. sehen bereits seit 2002 einen Trend zur Entwicklung von dreidimensionalen Visualisierungen von Geoinformationssystemen. Technologien zur Visualisierung großer Datenmengen in der Dreidimensionalität haben sich längst auf einem Niveau entwickelt, auf dem es möglich ist, komplexe Strukturen und Informationen in Echtzeit anzuzeigen, Interaktionsparadigmen beschränken sich jedoch häufig noch auf die klassischen Eingaben über Maus und Tastatur. Zwar wurden in den letzten Jahren die Darstellung in der virtuellen Realität als Anzeigekonzept für GIS aufgegriffen, Interaktionsparadigmen zogen jedoch meistens nicht mit. Da der Entwicklung einer stereoskopischen Maritimen Lagedarstellung die theoretische Grundlage eines geographischen Informationssystems, kurz GIS, zugrunde gelegt wird und somit eine spezielle Weiterentwicklung eines solchen ist, wurde in den Grundlagen dieser Arbeit auch auf die Entwicklungsgeschichte von GIS im allgemeinen und im speziellen Einsatz maritimen Kontext eingegangen. Im Fokus dieser Arbeit steht die Visualisierung von Unterwasserdaten in der Dreidimensionalität. Die Darstellung von Unterwasserhöhenprofilen ist dabei essentieller Bestandteil der maritimen Navigation, um das Situationsbewusstsein für die maritime

Routenplanung zu liefern und nicht zuletzt um Gefahrensituationen in Flachgewässern zu vermeiden. Derzeit im maritimen Einsatz befindliche elektronische Seekarten nutzen zur Darstellung in der Regel eine zweidimensionale Draufsicht, auf der unterschiedliche Tiefenregionen über Farbschattierung gekennzeichnet sind und dem Navigator so Informationen über sichere Fahrtiefen geben. Veränderungen des Meeresbodens können jedoch, ausgelöst durch Strömungen am Meeresboden in selten befahrenen Gewässern oder etwa nach Unglückssituationen durch Wrackteile, Gefahren für die Seeschifffahrt bedeuten. Durch Echtzeitkartographie des Meeresbodens, die durch am Wasserfahrzeug angebrachten Unterwassersensoren ermöglicht wird, können entsprechende Gefahren durch Auswertung der Unterwassersensordaten frühzeitig erkannt und damit eine entsprechende Reaktion eingeleitet werden. Daten moderner Unterwassersensoren können so aufbereitet werden, dass sie als georeferenzierte, dreidimensionale Punktwolke vorliegen. Eine dadurch mögliche dreidimensionale Visualisierung von Sensordaten ermöglicht eine schnelle Sichtung des aufgezeichneten Sensordatenmaterials und somit ein erhöhtes Situationsbewusstsein, welches sich durch die Anzeige des Datenmaterials in einer dreidimensionalen Referenzumgebung ergibt (Meyer, Bützler et al., 2014b). Die Integration entsprechender Datensätze wird im Konzept mit berücksichtigt, ist jedoch nicht Teil der Untersuchung.

3.4.1 Beschreibung des Gesamtsystems

Dem Konzept des Gesamtsystems wird aus den geführten Experteninterviews abgeleitet (vgl. Kapitel 2.9). Ziel des Gesamtsystems ist eine stereoskopisch visualisierte Lagedarstellung, welches als zentrales Datenverarbeitungssystem für Sensordaten als maritime Lagedarstellung fungiert. Dabei wird die Möglichkeit offen gelassen, alle in der Expertenbefragung diskutierten Szenarien abzubilden. Aufgrund der hohen Komplexität wird diese Absicht für die vorliegende Arbeit jedoch nicht angestrebt. Abbildung 3.2 zeigt eine Darstellung des Gesamtsystems nach Haberfellner et al. (2015), in dem die beteiligten Subsysteme mit ihren Beziehungen untereinander und die Systemgrenzen dargestellt sind. Das Interaktive System soll als Einzelarbeitsplatz umgesetzt werden, welcher als ubiquitäres System nach Bedarf mit Sensoren sowie Aktuatoren und Effektoren verbunden sein kann und in verschiedenen Szenarien eingesetzt werden kann.

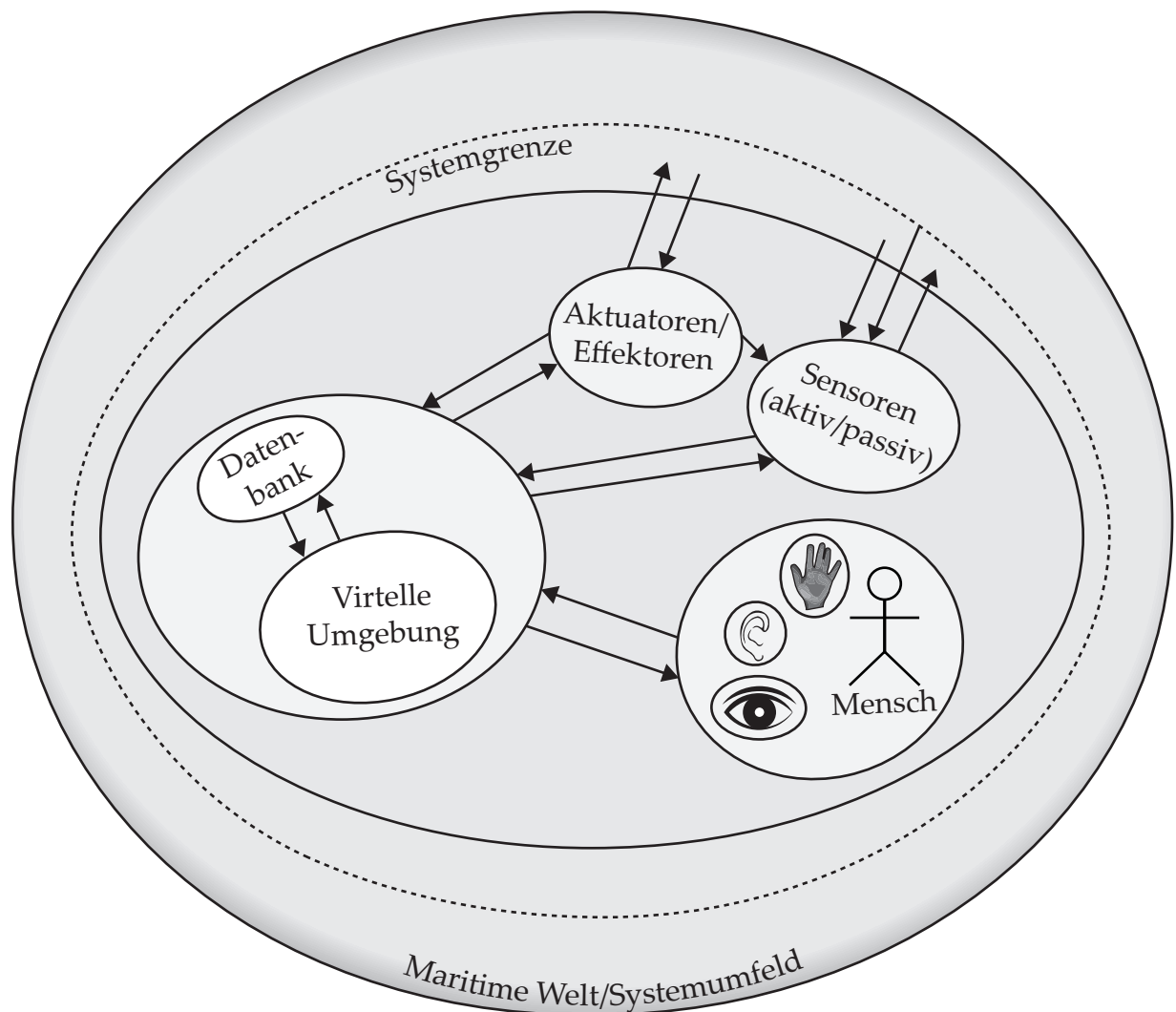


Abbildung 3.2: Systemschaubild des Gesamtsystems nach dem Vorbild von Haberfellner, de Weck, Fricke und Vössner (2015) mit Veranschaulichung der Subsysteme und deren Beziehungen und der durch die verfügbare Sensorik vorgegebene Systemgrenze (vgl. Haberfellner, de Weck, Fricke und Vössner (2015, S. 34-37))

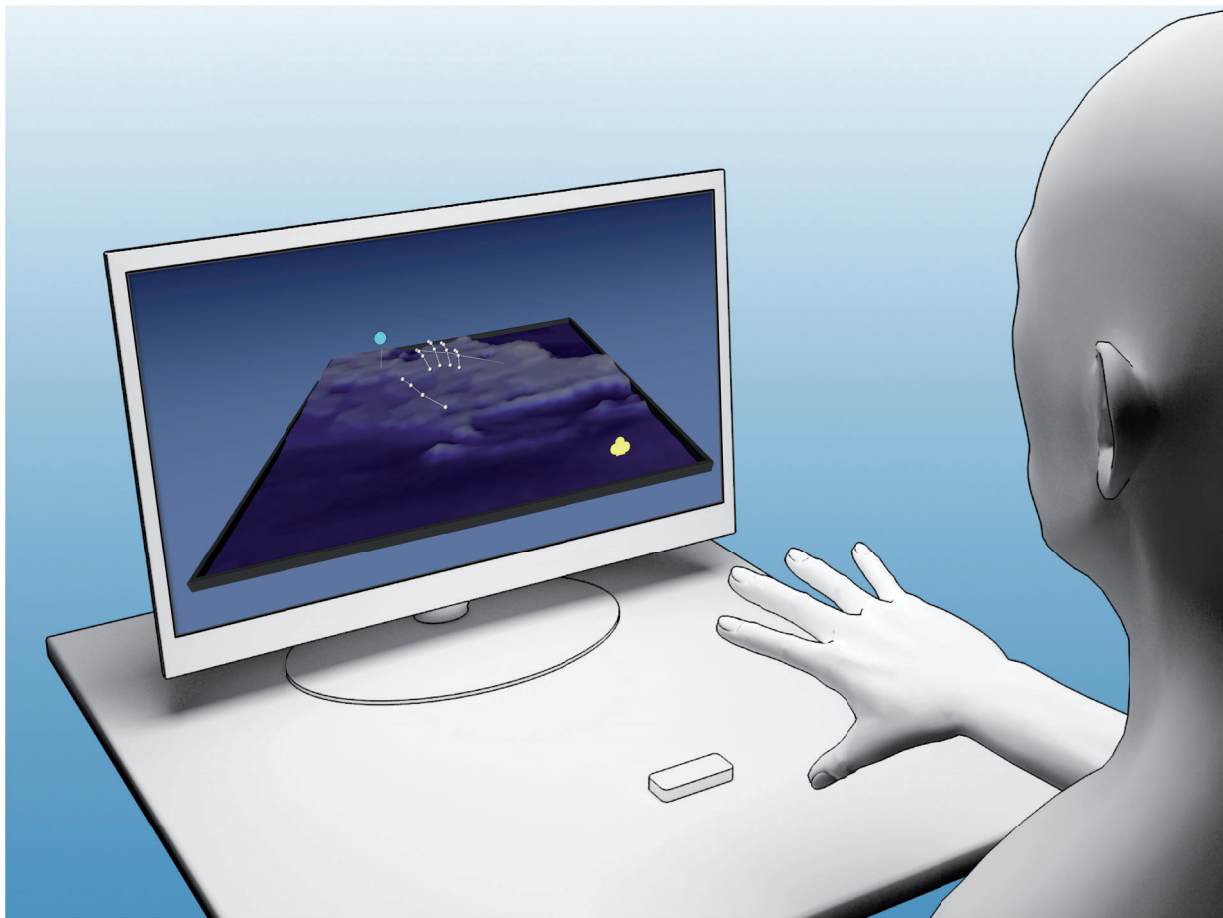


Abbildung 3.3: Schematischer Aufbau des prototypischen Arbeitsplatzes zur „Mid Air“-Interaktion mit maritimen 3D-Daten(Meyer, Bützler, Dzaack & Schlick, 2014a)

Die Gestaltung des Arbeitsplatzes des prototypischen Systems sieht die Verwendung von einer einzigen Arbeitsperson vor. Der prototypische Aufbau ist so konzipiert, dass es für einen möglichen Einsatz in einem Produktivsystem als zusätzliches Modul an einen bestehenden Arbeitsplatz angefügt werden und in Oberwasser- als auch in Unterwasserfahrzeugen eingesetzt, oder in engen Umgebungen, wie in Containern vorhanden, eingesetzt werden kann. Abbildung 3.3 zeigt den Aufbau des Arbeitsplatzes schematisch. Das Seekartenmaterial wird als dreidimensionales Höhenprofil dargestellt, das mit den für Seekarten üblichen Schattierungen visualisiert ist.

Die Steuerung des stereoskopisch dargestellten Kartenausschnittes soll über Handgesten (Greifgesten) der präferierten Hand des Nutzers erfolgen und beschränkt

sich auf translatorische und rotatorische Funktionen der Karte, sowie auf Vergrößerung und Verkleinerung des dargestellten Ausschnittes. Datenfelder, dargestellt als farbige Punktwolke, werden in der Übersicht der dreidimensionalen Seekarte symbolisch angezeigt und sollen mit dem über die präferierte Hand gesteuerten virtuellen Handmodell ausgewählt werden. Nach der Auswahl werden dem Nutzer über ein am Objekt angezeigtes, dreidimensionales dargestelltes Kontextdialog verschiedene Optionen wählen, unter anderem, die Kartenansicht auf das aufgezeichnete Datenfeld zu vergrößern. Im vergrößerten Ausschnitt soll die präferierte Hand weiterhin genutzt werden, um translatorische sowie rotatorische Veränderungen am Kartenausschnitt durchzuführen. Die so entstehende Hybridansicht zwischen zwei Darstellungen soll das Situationsbewusstsein eines Nutzers bei der Auswertung von Unterwasserdatensätzen unterstützen. Bei Gestaltung der Anforderungen werden Technologietrends und vorhandene prototypische Systeme für das Konzept berücksichtigt. Für die Erstellung des prototypischen Systems, welches im weiteren Verlauf der Arbeit zur Evaluierung bestimmter Teilsysteme des Gesamtkonzeptes genutzt wird, werden vor Beginn des Entwicklungsprozesses Anforderungsgruppen anhand der zuvor beschriebenen theoretischen Grundlagen erstellt.

3.4.2 Aufbau der Interaktionsumgebung

Als Eingabesystem für die virtuellen Handmodelle wird der Leap Motion Sensor verwendet (vgl. Kapitel 3.5.2). Im Versuchsaufbau stellt dieser die Möglichkeit bereit, verschiedene Handmodelle zu implementieren, welche genutzt werden um Dateneingaben in die stereoskopische Desktopumgebung vorzunehmen. Das Erfassungsvolumen des Sensors, und somit der Bewegungsraum der Hand, wird auf das gegebene Volumen des stereoskopischen Displays eingepasst. Die beiden Vektorräume in $R_{LeapMotion}$ und $R_{Seekarte}$ werden über Translationen und Skalierungen so übereinander gelegt, dass mit dem Handmodell theoretisch jeder Bereich der Seekarte erreicht werden kann.

3.4.3 Gestaltung der Handmodelle

Neuroergonomische Grundlagen zur Gestaltung der Handmodelle sind in Kapitel 2.4 beschrieben. Im Folgenden wird die graphische Gestaltung mit der minimalistischen

Darstellung der Handmodelle beschrieben und auf technische Eigenschaften eingegangen. Als Grundlage zur Gestaltung der Handmodelle wird das „Leap Motion“ Framework verwendet, welches auch die Basis für die technische Umsetzung der versetzt gesteuerten virtuellen Hand bildet. Durch das Framework liegen Positionsdaten einer realistischen Handdarstellung als virtuelles „Knochengerüst“ (engl. „Bones“) vor. Über dieses Knochengerüst kann eine beliebige Visualisierung gelegt werden. Die Modelldaten der Leap Motion Software bilden die Grundlage für die Darstellung der in der prototypischen Software verwendeten Handmodelle. Das innere Modell stellt sogenannte Gelenkpunkte zur Verfügung, die über bestimmte Eigenschaften verfügen. Der Aufbau des Modells orientiert sich am realen Aufbau der menschlichen Hand, wie er in Abbildung 3.15 dargestellt ist. Die Handmodelle sind so gestaltet, dass eine mögliche Obstruktion von Interaktionselementen in der virtuellen Welt von Modell zu Modell abnimmt. Die modellierte Hand soll ein zusätzlicher Tiefenhinweis in der virtuellen Umgebung darstellen und einen Rückschluss auf die reale menschliche Hand zulassen. Tiefenhinweise helfen, in einer dreidimensionalen Umgebung Entfernungen besser einzuschätzen. Eine ausführliche Beschreibung von Tiefenhinweisen und ihrer Nützlichkeit ist in Kapitel 2.2.2 dargelegt.

3.4.4 Entwicklung eines Interaktionsdialogkonzeptes für eine Stereoskopische Desktopumgebung

Im folgenden Kapitel wird auf die Gestaltung von interaktiven Dialogen in der Mensch-Computer-Interaktion eingegangen. In der DIN EN ISO 9241-16 (1999) werden Grundlagen zur direkten Objektmanipulation definiert. Ein auf der direkten Manipulation basierendes Dialogdesign sollte die Anlernzeit minimieren sowie die Effizienz des Nutzers steigern. Dies umfasst sowohl die Manipulation eines Dialoges selbst als auch das daraus für den Nutzer wahrnehmbare Feedback. Zunächst werden Gestaltungsgrundsätze für die Anwendung in zweidimensionalen Schnittstellen analysiert und die Anwendung für dreidimensionale Eingabegeräte erörtert. Hierbei werden ergonomische Faktoren mit berücksichtigt, die durch „Mid Air“-Interaktion bei der Nutzung von dreidimensionalen Eingabegeräten gegeben sind. Anschließend werden die erörterten Gestaltungsgrundsätze aufgegriffen und daraus Dialogkonzepte erstellt, die im weiteren Verlauf der vorliegenden Arbeit wissenschaftlich untersucht werden (Bowman, Wingrave et al., 2001).

Nach Bowman (2005) können Konzepte für Benutzungsschnittstellen, die für die Interaktion mit zweidimensional dargestellten Systemen konzipiert sind, in der Dreidimensionalität gleichermaßen angewendet werden und direkt in die dreidimensionale Darstellung eingebettet werden. Viele klassische Konzepte setzen diese Vorgehensweise bereits insofern konsequent um, als dass Interaktionsdialoge einfach opak über die dreidimensionale Welt gelegt werden. Genau diese Darstellungsweise löst jedoch den Bezug des Betrachters zur virtuellen Welt auf, sobald dieser eine Manipulation der virtuellen Welt über einen Dialog vornehmen möchte. Ein Immersionsbruch ist die Folge. Um einen solchen Immersionsbruch trotz des Einsatzes klassischer Dialoggestaltungselemente zu vermeiden, kann die zweidimensionale Darstellung von Interaktionsdialogen durch direkte Integration in die dreidimensionale Welt nützlich sein. Die Darstellung der Interaktionselemente muss dazu jedoch so umgesetzt werden, dass diese zu keiner Zeit durch die virtuelle Welt verdeckt werden. Das fehlende haptische Feedback, welches ein grundsätzliches Problem bei der Interaktion in der virtuellen Realität und in stereoskopischen Desktopumgebungen darstellt, wird von Bowman also mögliches Problem beschrieben, das zur Frustration bei der Nutzung von entsprechenden Dialogen in der dreidimensionalen Welt führt. Für voll-immersive virtuelle Realität kann dieses Problem umgangen werden, indem auf eine Installation von in der Realität physisch vorhandenen Kontaktflächen vorgenommen wird, um die Ausführung einer Bewegung, die gleichwohl in der virtuellen und realen Welt durchgeführt werden, in der realen Welt zu begrenzen. Die Gestaltung von Benutzungsschnittstellen wird dadurch jedoch stark limitiert, da sich die Platzierung der Dialoge immer auf physische Objekte beziehen muss, die folglich auch in der realen Welt fix vorhanden sind. Die Gestaltung von Interaktionsdialogen verliert dadurch ihre Flexibilität und die durch die Anwendung virtueller Realität entstandenen Vorteile werden wieder aufgehoben. In der DIN EN ISO (2008) sind die sieben Grundsätze der Dialoggestaltung in allgemeiner Form beschrieben, das heißt, sie werden ohne Bezug auf die Arbeitssituation, Anwendung, Arbeitsumgebung, oder Technik dargestellt DIN EN ISO (2008). Sie stellt einen Rahmen für die Anwendung der beschriebenen Grundsätze bei der Analyse, Gestaltung und Bewertung interaktiver Systeme dar und werden als allgemeine Gestaltungshinweise für die Umsetzung der in dieser Arbeit verwendeten Interaktionsparadigmen angewendet. Hierbei werden ergonomische Faktoren mit berücksichtigt, die durch „Mid Air“ Interaktion bei der Nutzung von dreidimensionalen Eingabegeräten gegeben sind. Es werden die

erörterten Gestaltungsgrundsätze aufgegriffen und verschiedene Dialogkonzepte erstellt, die im weiteren Verlauf der vorliegenden Arbeit wissenschaftlich untersucht werden. Diese Erkenntnisse lassen sich auf den dreidimensionalen Raum erweitern und dienen als Grundlage für die Gestaltung des Interaktionsparadigmas für diese Forschungsarbeit. Die erörterten Gestaltungsgrundsätze werden aufgegriffen und als Grundlage für ein Dialogkonzept verwendet, welches die im weiteren Verlauf der vorliegenden Arbeit wissenschaftlich untersucht wird.

Callahan, Hopkins, Weiser und Shneiderman (1988) vergleichen in einer Studie verschiedene Dialogstrukturen, die mit einer Computermouse bedient werden. Verglichen werden linear aufgebaute Dialogstrukturen mit „Pie Menu“-förmig („Pie“ engl. Kuchen, also „kuchenartige“ Dialogdarstellung) aufgebauten Dialogstrukturen. Als „Pie Menu“-förmige Dialogstrukturen werden solche bezeichnet, bei denen sich die Auswahlmöglichkeiten kreisförmig um den Eingabezeiger aufbauen. In einer empirischen Studie mit Messwiederholung untersuchten Callahan et al. die Auswahlzeiten bei der Bedienung unterschiedlicher Dialogstrukturen. Die „Pie Menu“-förmige Anordnung ermöglichte im Vergleich signifikant schnellere Ausführungszeiten. (Sunnari, Arhipainen, Pakanen & Hickey, 2012) untersuchen die Gestaltung von Dialogstrukturen auf mobilen Endgeräten mit autostereoskopischer Darstellung. Für die Umsetzung der Dialogstruktur wurde eine sogenannte „Carrousel“-Struktur ausgewählt, in der Dialogelemente kreisförmig in der horizontalen angeordnet wurden. Die Drehachse der Struktur lag parallel zur Sichtachse (vgl. Abbildung 3.4). Durch diese Anordnung überdeckten sich Dialogpunkte immer wieder gegenseitig. Zu aktivierende Elemente mussten in den Vordergrund rotiert werden um aktiviert werden zu können während hinten liegende Dialogpunkte nicht aktivierbar waren, um Fehlauflösungen zu verhindern. Das Konzept von Sunnari et al. (2012) sieht keine Interaktion in der Dreidimensionalität vor, wobei ohnehin eine Beschränkung der Eingabe auf zwei Freiheitsgrade gegeben ist, da zur Eingabe die berührungssensitive Oberfläche des eingesetzten Endgerätes verwendet wurde. 67 Prozent der befragten Nutzer zogen in einer Vergleichsstudie eine zweidimensional visualisierte Variante des Interaktionsdialoges der stereoskopischen Variante vor, da mit dieser schneller interagiert werden konnte und der Raum auf dem zur Verfügung stehenden Display besser ausgenutzt wurde. Zwar wurde der Interaktionsdialog von den meisten Nutzern als visuell ansprechend, innovativ und sogar unterhaltsam beschrieben, jedoch wurden Punkte wie mangelnde Darstellungsqualität sowie Aspekte der Benutzungsfreundlichkeit



Abbildung 3.4: Gestaltung des „Caraousel“-Dialogs auf mobilem Endgerät (Sunnari, Arhippainen, Pakanen & Hickey, 2012)

in der subjektiven Analyse bemängelt. Diese Punkte können jedoch auch auf die Eigenschaften des Endgerätes sowie ein Design, welches nicht auf das Endgerät abgestimmt ist, zurückgeführt werden. Zudem bot die stereoskopische Visualisierung und die damit gegebene Tiefe keine Vorteile gegenüber der nicht-stereoskopischen Visualisierung.

Ren und O'Neill (2012) vergleichen in einer Experimentalstudie oktagonale und rechteckige Dialogstrukturen in einer stereoskopischen 3D Umgebung, welche über „Mid Air“-Zeigebewegungen aktiviert werden. Ziel der Untersuchung war die Bestimmung der Benutzungsfreundlichkeit der verschiedenen Layout-Strukturen und geben Gestaltungsempfehlungen für den Einsatz von Dialogstrukturen in dreidimensionalen Umgebungen ab. Ren und O'Neill deuten mit ihren Ergebnissen aus der experimentellen Studie auch darauf hin, dass sorgfältig überlegt werden sollte, ob Erkenntnisse aus Interaktionstechniken für Geräte mit Handkontakt auf die „Mid Air“-Interaktion übertragen werden sollte. Der Einsatz von „Mid Air“-Interaktion wird von Ren und O'Neill (2012) als potentiell wertvolle Technik angeführt, welche flexible und freie Interaktion in dreidimensionalen Umgebungen ermöglicht, weisen aber auf den großen „Design Space“ hin, in dem ein solches Paradigma mit einer Menuinteraktion eingesetzt werden kann.

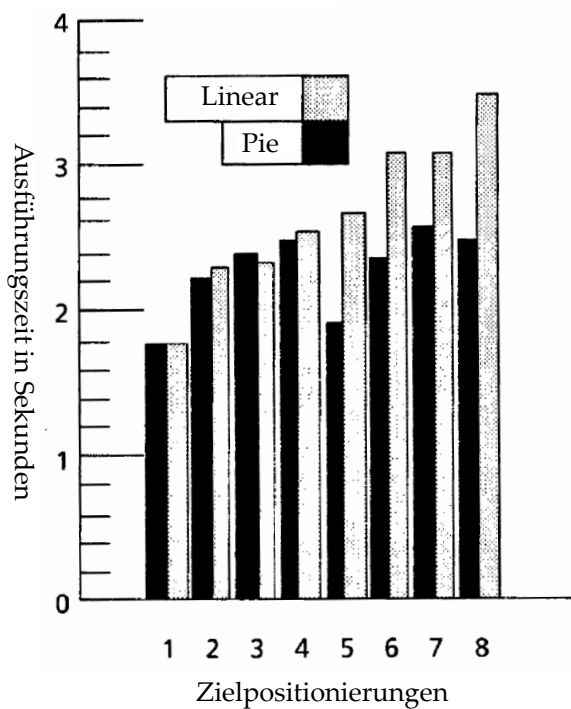


Abbildung 3.5: Vergleichendes Balkendiagramm der Zielpositionierungen vs. Ausführungszeit in Sekunden (vgl. Callahan et al. (1988))

Callahan et al. (1988) verglichen in einer Studie verschiedene Dialogstrukturen, die mit einer Computermaus bedient werden. Verglichen wurden die Auswahlzeiten von vertikal-linearaufgebaute Dialogstrukturen mit „Pie Menu“-form bzw. kreisförmig aufgebauten Dialogstrukturen. Die Zielauswahl bei Bedienung von „Pie Menus“ wurde von Nutzern signifikant schneller ausgeführt. In Abbildung 3.5 ist ein linearer Anstieg der Ausführungszeit mit steigender Entfernung der Ziele für lineare Dialoganordnungen erkennbar. In den „Pie Menus“ dagegen ist zwischen den Faktoren Zeit und Entfernung kaum ein Anstieg erkennbar. Der Wege-Vorteil durch die kreisförmige Anordnung kann somit auch für die Interaktion mit einer Computermaus als Interaktionsmedium beobachtet werden.

Ein ebenso wichtiger Punkt in der klassischen Mensch-Computer-Interaktion mit Maus und Tastatur oder per berührungsempfindlicher Bildschirmoberfläche ist die Empfindung haptischer Rückmeldung bei der Interaktion mit einer Bedienoberfläche, welches durch das Berühren der Oberfläche oder durch die Bedienung eines Tasters ausgelöst wird. Bei berührungsempfindlichen Bildschirmoberflächen wird dieses haptische Feedback bei der Aktivierung eines Interaktionsdialoges häufig durch ein vibrotaktilen Feedback ergänzt. Da bei der „Mid Air“-Interaktion kein haptisches Feedback an den Nutzer über Erfolg oder Misserfolg einer Nutzerintention gegeben wird, muss bei der Gestaltung entsprechend salientes Feedback auf visueller Ebene zurückgegeben werden, um Erfolg einer Interaktion zu signalisieren. Bleibt dieses Feedback bei Auslösung aus, kann nicht klar zwischen fehlender Auslösung und Fehlauslösung differenziert werden.

In einer Studie von Das und Borst (2010) wird die Performanz zweier unterschiedlicher Dialogstrukturen in einer virtuellen Umgebung genauer untersucht. Die virtuelle Umgebung bestand aus einer Projektionsleinwand, für die Nutzer eine stereoskopische Brille tragen mussten. Abbildung 3.6 zeigt die verschiedenen Interaktionsdialoge, rechts im Bild eine vertikal-lineare Struktur und links im Bild eine Struktur nach dem Vorbild des „Pie Menus“. Im Vergleich wurden auch die Positionierung des Dialoges im „Kontext“, also am zu bearbeitenden Objekt, und „Fest“, also fest in der virtuellen Welt an immer gleicher Stelle, untersucht. Für eine Positionierung des Dialoges im „Kontext“ muss nach Das und Borst gewährleistet sein, dass keine Objekte vom Interaktionsdialog verdeckt werden, die vom Nutzer verändert oder bearbeitet werden sollen. Ist dies gewährleistet, ist ein Geschwindigkeitsvorteil bei der Interaktion gegenüber eines fest in der Welt verankerten Interaktionsdialoges gegeben. In einer Probandenstudie mit faktoriellem Design und 34 Versuchsteilnehmern wurde die Zeit in Millisekunden verglichen, die für die Auswahl eines Dialoges benötigt wurde. Für den Interaktionsdialog mit der „Pie Menu“-Struktur konnten signifikant schnellere Auswahlzeiten gegenüber der vertikal-linearen Struktur gemessen werden, die Fehlerrate war ebenfalls signifikant geringer. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse werden in das Konzept für die Systemkonzeption mit aufgenommen. Das und Borst (2010) geben an, die Skalierung der Interaktionsdialoge im Versuch vernachlässigt zu haben, weisen aber auf den möglichen Einfluss der Skalierung des Dialoges hin. Ein zu klein skaliertes Interaktionsdialog ist schwieriger zu treffen, unabhängig von der Zeigemethode. Um diesen Effekt zu eliminieren, wird die Skalierung für das Systemkonzept konstant gehalten, unabhängig in welcher Tiefe der Interaktionsdialog dargestellt wird.

Nachfolgend wird auf die Gestaltung der Interaktionsdialoge für die Interaktion mit der stereoskopischen Lagedarstellung eingegangen. Das im hier aufgebauten prototypischen System verwendete Konzept ist als „Mid Air“ Interaktion mit einem virtuellen Handmodell konzipiert. Die Hand- und Fingerbewegungen sowie deren Position werden absolut mit einer Infrarotkamera erfasst und in das System übertragen. Auf einen Datenhandschuh oder ähnliche, auf der Haut anliegende Systeme, wird bewusst verzichtet. Der Einsatz von haptischem Feedback auf einen Finger oder die ganze Hand ist daher nicht gegeben und das Feedback an den Nutzer kann auditiv oder visuell erfolgen. Die erfolgreiche Durchführung einer Interaktion wird dem Nutzer über ein visuelles Rückkopplungssignal bestätigt. Das Rückkopp-

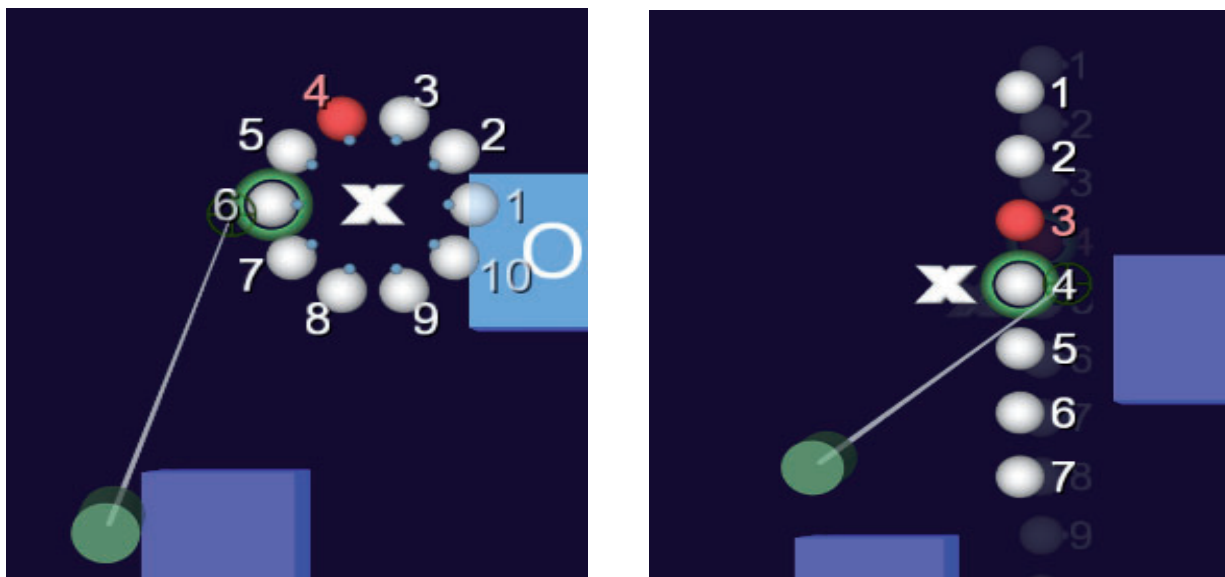


Abbildung 3.6: Interaktionsdialog als „Pie Menu“-Struktur und linearer Struktur in einer virtuellen Umgebung von Das und Borst (2010)

lungssignal erfolgt über einen sich über die Zeit verändernden Farbgradienten von einer Viertelsekunde (250 ms). Der Farbgradient beginnt bei Aktivierung mit dem RGB-Code „Weiß“ (FF-FF-FF) und verändert sich stetig zur Ausgangsfarbe über die Viertelsekunde zurück. Dadurch entsteht eine Art „Blitz“-Effekt und der Nutzer erhält eine visuelle Rückkopplung über die Aktivierung eines Interaktionsdialogs. Die Größe des „Pie Menu“-Interaktionsdialoges, damit also die Länge des Kreisbogens, wird bis zu einem gewissen Grad über die Anzahl der Interaktionsdialoge bestimmt. Ab einer erhöhten Anzahl der Interaktionsfelder in einem „Pie Menu“ können die Kreisbögen verkleinert werden. Das Konzept des „Pie Menus“ ermöglicht theoretisch eine Vielzahl von aufeinander folgenden Schritten in einem Interaktionsdialog, je nachdem welche Dialogtiefe für die Bearbeitung verschiedener Aufgaben an einem Objekt benötigt wird. Für das Konzept sind zwei verschiedene Varianten denkbar:

1. Die nächste Stufe der Interaktionstiefe öffnet sich für jeden neuen Interaktionsdialog von der Mitte des „Pie Menu“-Interaktionsdialoges vom Zentrum des Interaktionsobjektes nach außen weg. Der Radius des Interaktionsdialoges vergrößert sich dadurch mit zunehmender Dialogtiefe. Es können dadurch mit zunehmender Dialogtiefe mehr Interaktionsfelder angeordnet werden, ohne dass diese maßgeblich in der Fläche verkleinert werden müssen (vgl. Abbildung

3.7).

2. Die nächste Stufe der Dialogtiefe öffnet sich für jeden neuen Interaktionsdialog im Wechsel oberhalb, in der nächsten Stufe unterhalb des „Pie Menu“-Interaktionsdialoges. Der Radius des Interaktionsdialoges ist dadurch auf eine vordefinierte Größe begrenzt. Um eine Vielzahl an Interaktionsfeldern in einem Interaktionsdialog anzuordnen, ist eine Verkleinerung der Interaktionsfelder notwendig (vgl. Abbildung 3.8).

Die Anordnung der Interaktionsfelder in den Subinteraktionsdialogen bestimmt die Bewegungen, die mit dem Interaktionsmedium, in diesem Falle eine virtuelle Hand, durchgeführt werden müssen. Für eine vom Nutzer gewünschte Interaktion ist eine Aktivierung des Interaktionsfeldes notwendig. Das Konzept sieht eine „Mid Air“-Interaktion vor. Konzeptbedingt kann dem Nutzer kein haptisches Feedback über die Auslösung oder Fehlauslösung eines Interaktionsfeldes gegeben werden. Um eine geeignete Methode zur Aktivierung eines Interaktionsdialoges zu entwickeln, wurden zwei klassische Ansätze als Aktivierungsmethode eines Interaktionsfeldes gewählt.

1. Um eine Interaktionsfläche zu aktivieren, wird vom Nutzer eine klassische Drückbewegung erwartet. Der Mechanismus orientiert sich an dem eines klassischen Druckknopfes. Die Drückbewegung erfolgt in die Tiefe des Displayvolumens (vgl. Abbildung 3.9).
2. Um eine Interaktionsfläche zu aktivieren, wird vom Nutzer eine „Swipe Out“-Bewegung des Interaktionsmediums zur Mitte der Interaktionsfläche hin erwartet. Die Bewegung erfolgt parallel zur Sichtebene (vgl. Abbildung 3.10).

3.5 Auswahl der Middleware

Die gewünschte Funktionalität der maritimen Software ist durch die umfangreiche Dokumentation aus den Experteninterviews und den Vorgaben von Standardsoftware aus dem Bereich der maritimen Geoinformationssysteme ausreichend definiert. Darauf basierend wird Middleware ausgewählt, die über Schnittstellen auf Softwareebene miteinander verknüpft wird.

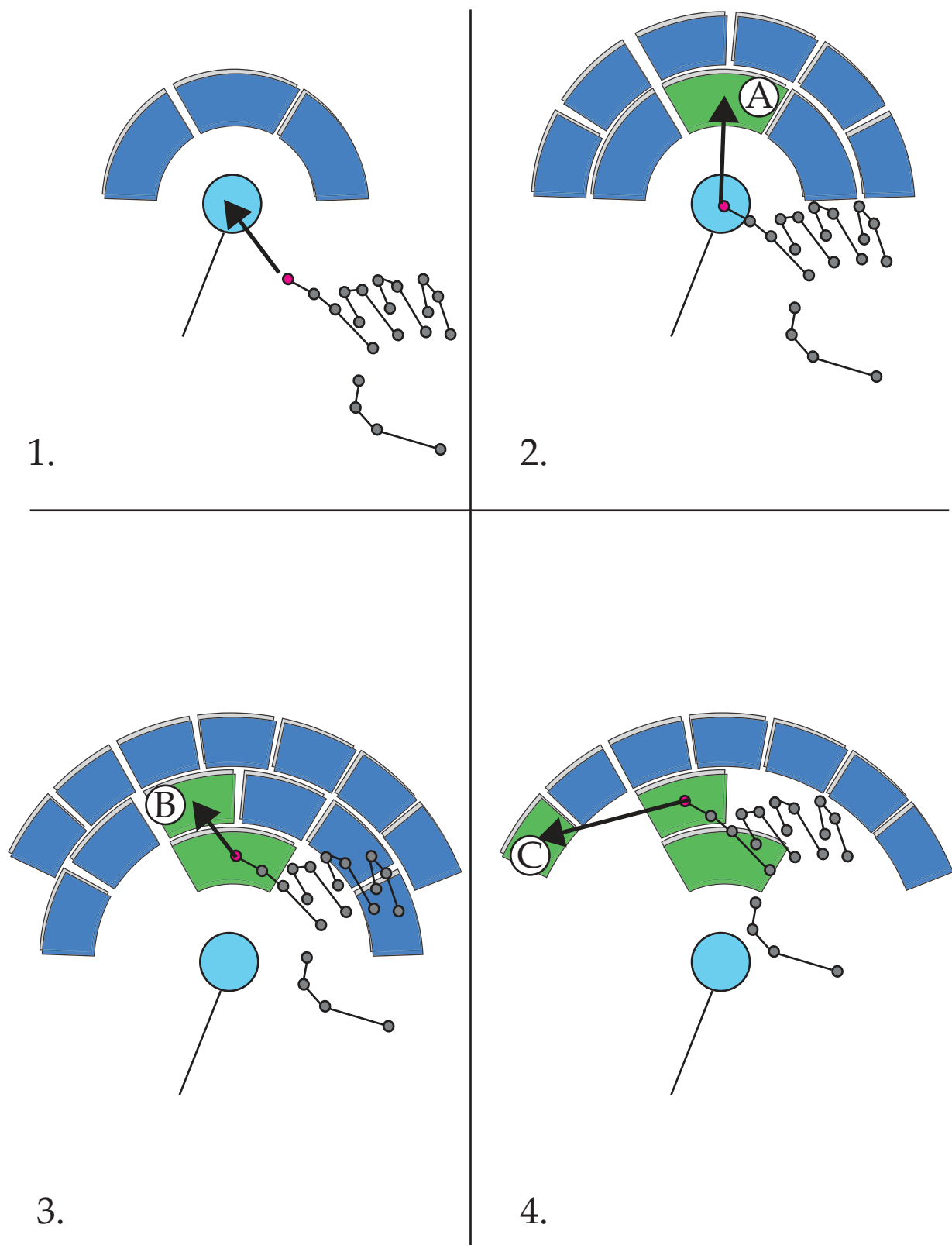


Abbildung 3.7: „Pie Menu“-Interaktion: Zunehmender Radius mit zunehmender Dialogtiefe

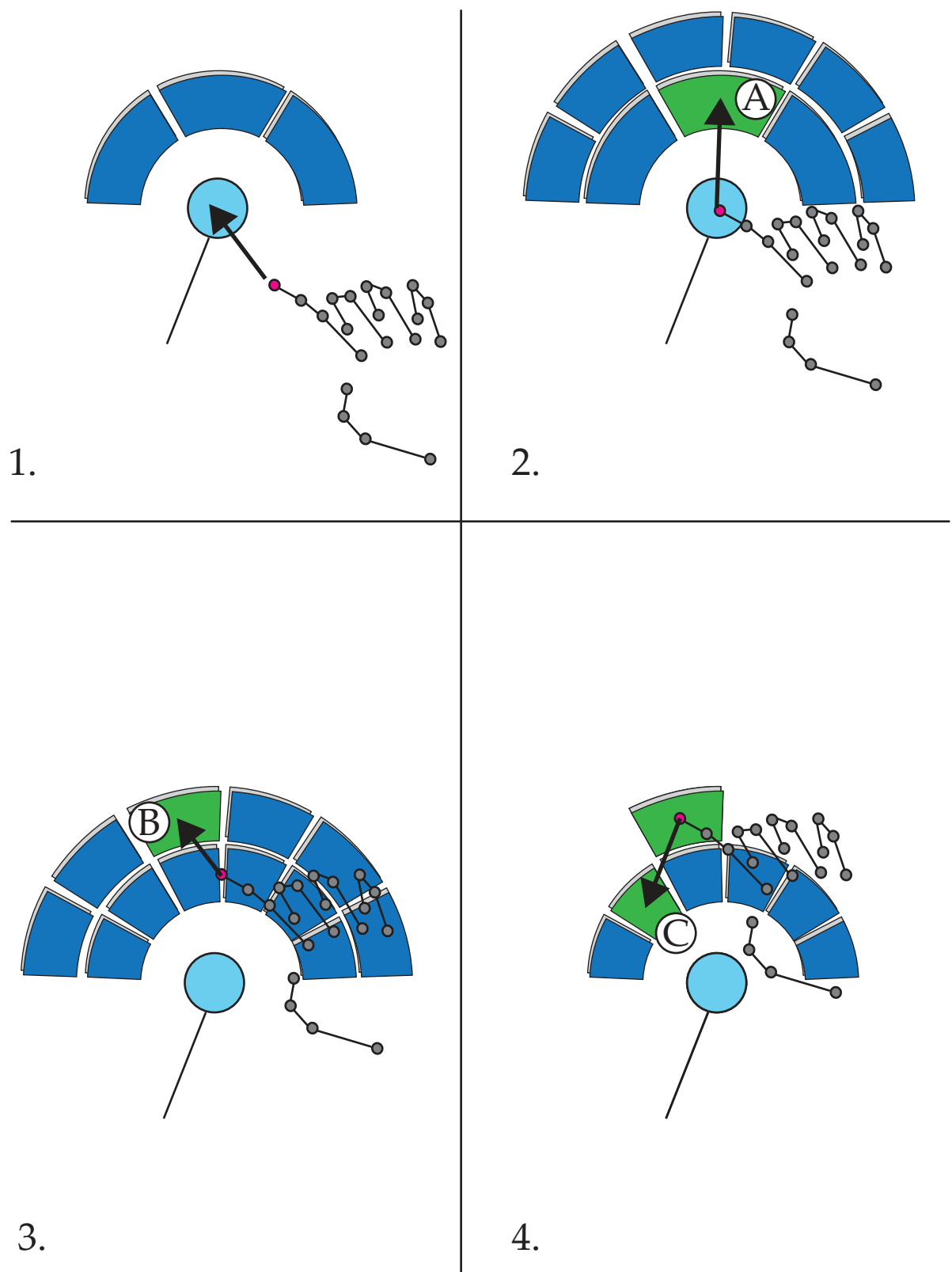


Abbildung 3.8: „Pie Menu“-Interaktion: Gleich bleibender Radius mit zunehmender Dialogtiefe

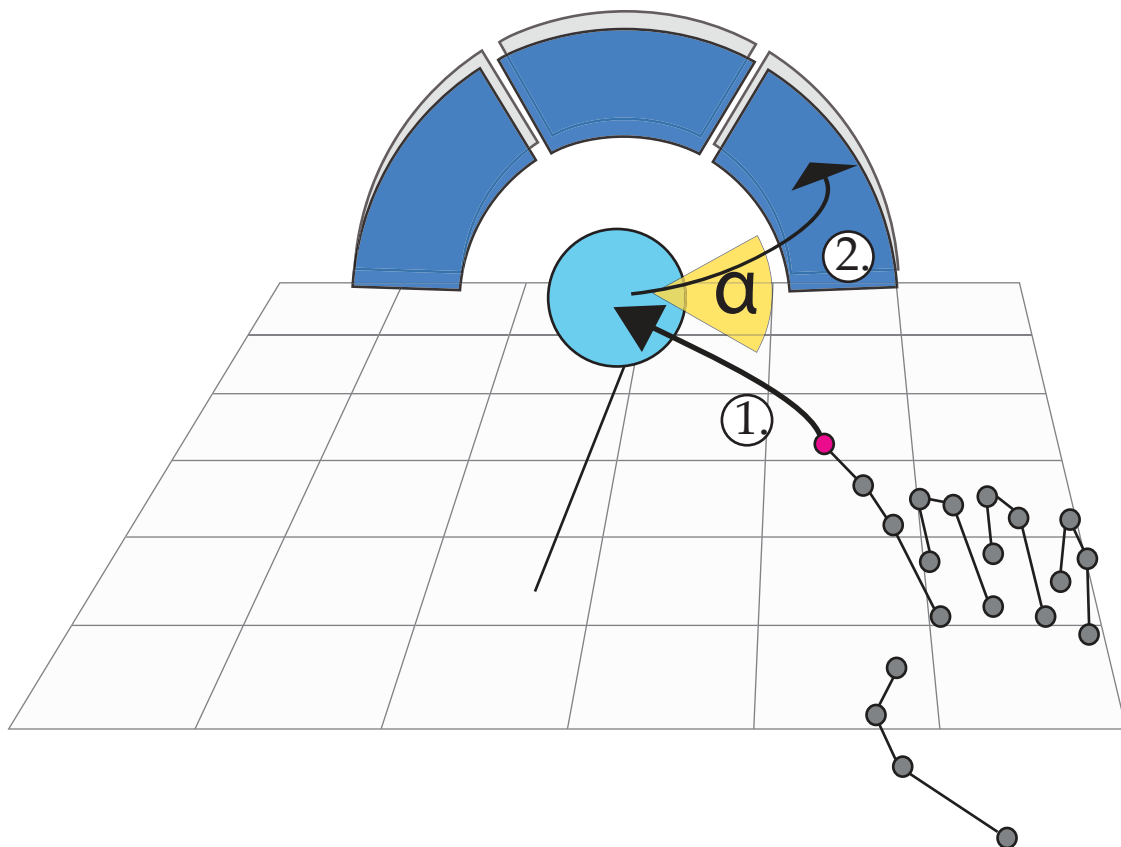


Abbildung 3.9: Interaktionsdialogvariante, bei der zwei Oberflächen nacheinander mit dem Interaktionsmedium durchschnitten werden müssen (Klassische „Drückbewegung“).

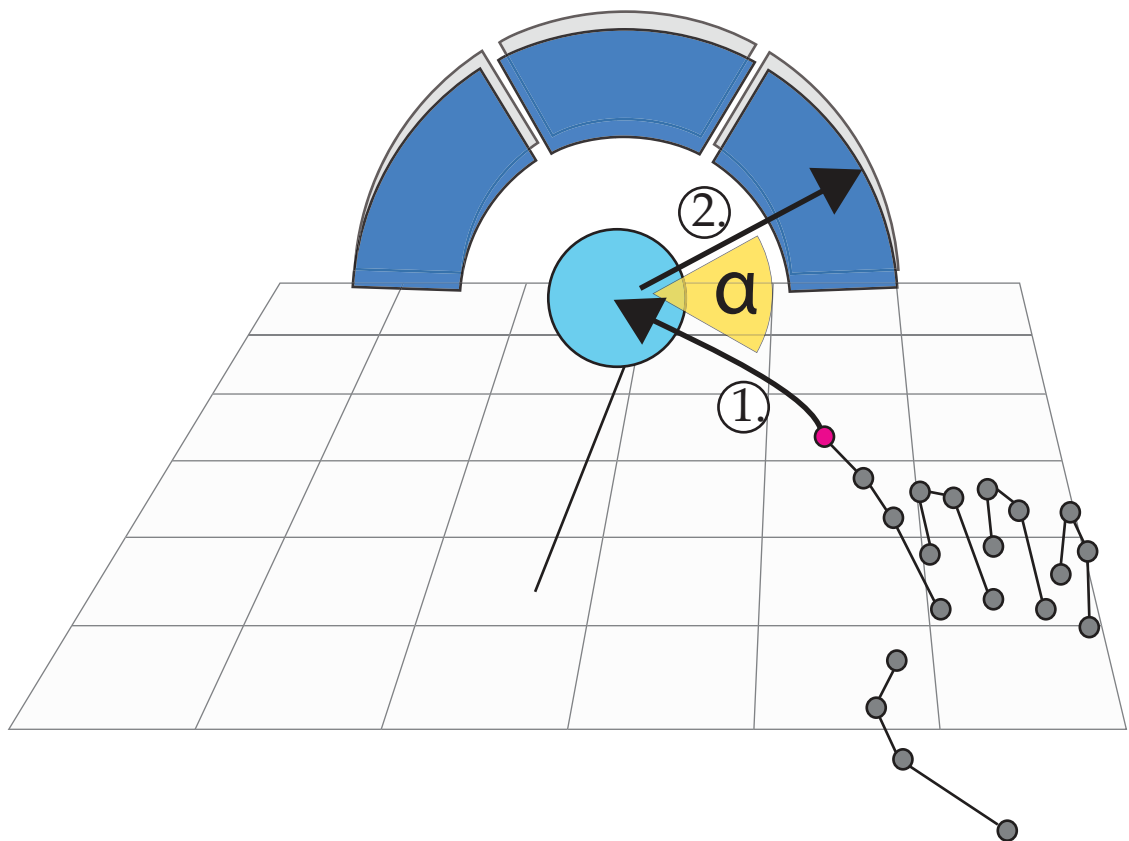


Abbildung 3.10: Interaktionsdialogvariante, bei der das Interaktionsmedium zwischen zwei Flächen hindurch bewegt werden muss.

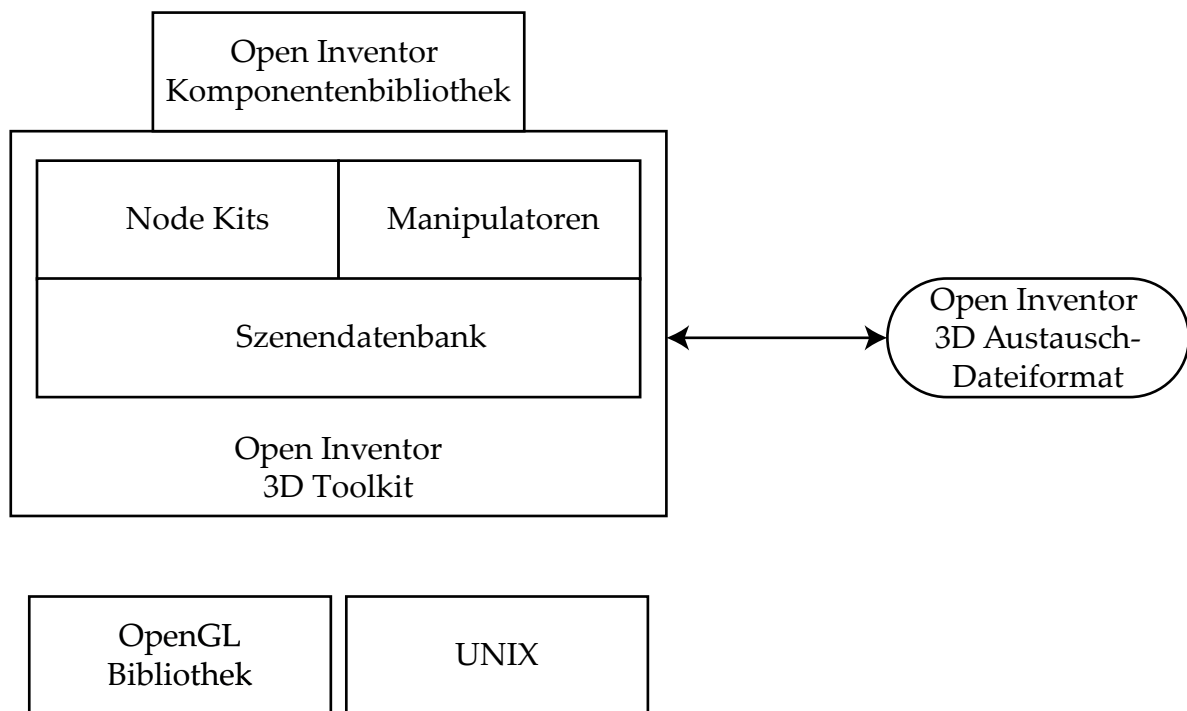
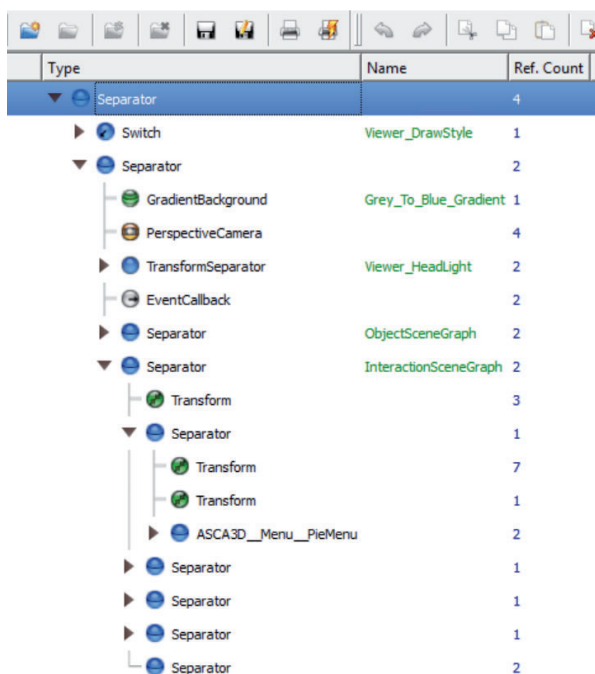


Abbildung 3.11: Open Inventor: Architektur über einzelne Module

3.5.1 Open Inventor Framework

Für die Implementierung der prototypischen Software wurde das Softwareframework Open Inventor verwendet. Die Ursprungsversion des Open Inventor Frameworks wurde in den Jahren 1988/1989 als objektorientierte Programmbibliothek von „Silicon Graphics“ zur Beschleunigung der Entwicklung von OpenGL-Anwendungen entwickelt. Open Inventor wurde anschließend von der Firma FEI/VSG als proprietäre Software weiterentwickelt und vertrieben und liegt zum Zeitpunkt der Implementierung des prototypischen Systems in der Version 9.4.1 vor. Die Softwarearchitektur von Open Inventor wird als Grundlage der Softwarearchitektur des implementierten prototypischen Systems genutzt und um die für die Anwendung notwendigen Module erweitert. Die Basisarchitektur von Open Inventor ist in Abbildung 3.11 für ein Microsoft Windows-System abgebildet. Open Inventor stellt ein objektorientiertes Framework zur Verfügung, welches den Zugriff auf Funktionen auf höherer Softwareebene ermöglicht und durch erweiterbar ist. Viele Grundfunktionen sind im Framework bereits implementiert und können für den Prototyp verwendet werden. Der direkte Zugriff auf OpenGL-Funktionen ist trotzdem möglich und er-

laubt die Erweiterung des Frameworks um eigenen Programmcode, der direkt auf der Grafikpipeline der Grafikkarte ausgeführt werden kann. Die Erweiterung des Open Inventor Softwareframeworks um die notwendigen Softwaremodule, die für die Erfüllung der in Kapitel 3.2 notwendig sind, werden in Kapitel 3.6 beschrieben. Open Inventor nutzt eine zentrale Datenbank, in der 3D Objekte und Funktionen gespeichert werden. Diese so gespeicherten Elemente werden während der Laufzeit in einem Szenegraphen aufgebaut, der für die Darstellung und den Aufruf von Funktionen innerhalb des Open Inventor Frameworks verwendet wird. Eine ausführliche Dokumentation von Open Inventor wird von FEI/VSG online zur Verfügung gestellt².



Type	Name	Ref. Count
Separator		4
Switch	Viewer_DrawStyle	1
Separator		2
GradientBackground	Grey_To_Blue_Gradient	1
PerspectiveCamera		4
TransformSeparator	Viewer_HeadLight	2
EventCallback		2
Separator	ObjectSceneGraph	2
Separator	InteractionSceneGraph	2
Transform		3
Separator		1
Transform		7
Transform		1
ASCA3D_Menu_PieMenu		2
Separator		1
Separator		1
Separator		1
Separator		2

Abbildung 3.12: OIV Szenegraph

Open Inventor Szenegraph Der Open Inventor Szenegraph besteht aus einem oder mehreren sogenannten Nodes, von denen jeder eine Geometrie, Eigenschaft oder ein Gruppierungsobjekt darstellt. Der Szenegraph ist hierarchisch aufgebaut, indem Knoten als sogenannte „Kinder“ von Gruppierungsknoten hinzugefügt werden, was zu einem gerichteten azyklischen Graphen führt. In der Open Inventor Architektur (Abbildung 3.11) wird eine Szenegraph durch die gesamte Szenendatenbank repräsentiert. Open Inventor bietet zur Laufzeit die Möglichkeit, den Szenegraphen zu sichten und zu manipulieren. Dabei kann auch auf die einzelnen Datenfelder zugegriffen werden.

In Abbildung 3.12 ist ein Bildschirmfoto des Szenegraphen der maritimen Lagedarstellung abgebildet.

Kollisionsabfrage Die Kollisionsabfrage von OpenInventor stellt mehrere Modelle zur Kollisionsabfrage unter Objekten bereit. Damit ist die Analyse des kompletten

²<http://developer94.openinventor.com>

Szenegraphen möglich, um Schnittmengen zwischen sich überschneidenden Geometrieobjekten zu erkennen. Die Kollisionserkennung geschieht dabei in zwei Schritten. Im ersten Schritt werden zunächst Schnittmengen zwischen sogenannten „Bounding Boxen“ erkannt, also Würfelobjekte, die auf die genaue Objektgröße skaliert wurden. Wenn sich zwei Würfel schneiden, wird Feedback an eine Funktion übergeben, welche die Kollision als erkannt zurückgibt, und die Kollisionserkennung stoppen könnte (FEI/VSG, 2015). Geschieht dies nicht, wird in einem zweiten Schritt eine Kollisionserkennung auf der eigentlichen Geometrie der sich schneidenden Objekte durchgeführt. Damit kann auch herausgefunden werden, welche Polygone der Geometrie des Objektes sich genau schneiden. Der zweite Schritt ist deutlich rechenaufwendiger. Da Open Inventor auch Schnittmengen berechnet, wenn Objekte ausgeblendet jedoch in den Szenegraphen eingegangen sind, ist es sinnvoll, nur für bestimmte Teile des Szenegraphen eine Kollisionsabfrage durchzuführen. Somit lassen sich die Interaktionsobjekte auf Polygonebene auf Kollisionen überprüfen, ohne dass die Gesamtperformanz des Systems negativ beeinflusst wird.

3.5.2 Leap Motion Sensor

Mit dem Leap Motion Sensor kann das Muster der menschlichen Hand über eine im Sensor verbaute Infrarot Stereo-Kamera aufgezeichnet werden. Durch drei im Gerät verbaute Infrarot LED's ³, werden zu erfassende Objekte, die sich über dem Gerät befinden, angestrahlt. Das Stereo-Kamerasystem mit Infrarot-Lichtfiltern erfasst Objekte, die sich im Sichtfeld der Stereo-Kamera befinden (Übersicht in Abbildung 3.13). Über einen Algorithmus wird anschließend die Lage des Objektes in einem kartesischen Koordinatensystem berechnet. Die von der Leap Motion verwendeten Algorithmen bilden die Gelenkpunkte der menschlichen Hand in Echtzeit im dreidimensionalen Raum nach und können dazu verwendet werden, ein virtuelles Modell der Hand des Nutzers als Eingabemedium in Echtzeit mit einer Abtastrate von 115 Bildern pro Sekunde in das virtuelle System zu übertragen. Die Auswertung des Bilddatenstroms und permanente Berechnung der erforderlichen Modelle erfolgt über einen Dienst, der auf Betriebssystemebene dauerhaft im Hintergrund ausgeführt wird. Die Daten können auf zwei verschiedene Arten abgegriffen werden. Die erste Variante ist die

³LED: Akronym für Light Emitting Diode, also Licht-emittierende Diode, die auf Basis der Elektrolumineszenz elektromagnetische Strahlung im Infrarotbereich absondert.

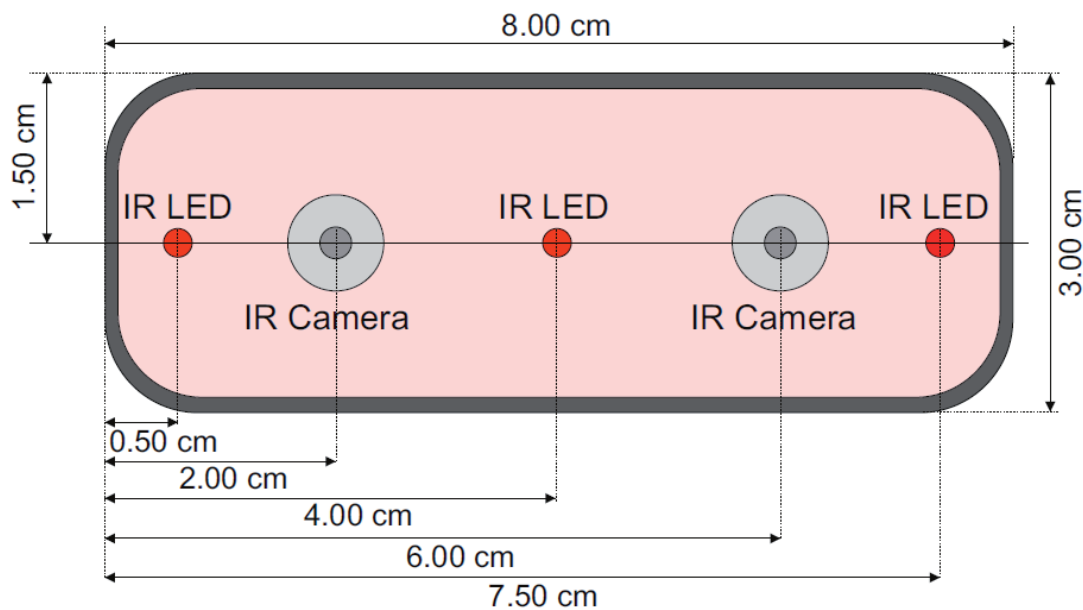


Abbildung 3.13: Anordnung Infrarotbeleuchtung und Infrarotkameras des Leap Motion Controllers (Weichert, Bachmann, Rudak und Fisseler (2013))

Einbindung einer dynamischen Programmbibliothek oder „Dynamic Link Library“, kurz DLL, in die für die Implementierung zu verwendenden Softwarebibliotheken vom Open Inventor Softwareframework. Eine andere Möglichkeit ist der Zugriff auf die Modelldaten über ein sogenanntes Websocket Interface, auf welches die Modelldaten weitergeleitet werden. Damit sind alle Modelle, die vom Dienst berechnet werden auf der lokalen Netzwerkschnittstelle auf einem bestimmten „Port“⁴ verfügbar. So kann theoretisch jede Anwendung, die über einen Netzwerkzugriff verfügt, auf die Modelldaten zugreifen. Der Leap Motion Sensor ist eine „Component of the Shelf“-Lösung, welche die Voraussetzungen für ein desktopbasiertes System erfüllt und wird als Eingabegerät zur Erfassung der Basisdaten für die Umsetzung der Handmodelle eingesetzt. Das Leap Motion Softwareframework verwendet ein internes Modell einer menschlichen Hand, um eine prädiktive Verfolgung zu ermöglichen. Dieses interne Modell bleibt bestehen, auch wenn Teile einer erfassten Hand nicht sichtbar sind.

⁴Auf einem sogenannten „Port“ können Datenpakete abgegriffen werden, die über das TCP/IP- oder UDP-Protokoll versendet werden. Über einen „Port“ kann die Netzwerkadresse weiter spezifiziert werden, um zwischen Client und Server Datenpakete zu übertragen. In der Regel sind bestimmte „Port“-Nummern bereits bestimmten Anwendungen vorbehalten, beispielsweise „Port“ 80 für Internetanwendungen.



Abbildung 3.14: Leap Motion Controller ohne Abdeckung (Weichert, Bachmann, Rudak und Fisseler (2013))

Das Handmodell stellt immer Positionen für fünf Finger bereit. Die Konfidenz dieser Daten ist am höchsten, wenn alle Finger von der Stereokamera erfasst werden. Das interne Modell verwendet die sichtbaren Teile der Hand, ihr internes Modell und Beobachtungen aus der Vergangenheit, um eine prädiktive Schätzung für die Teile der Hand vorzunehmen, die derzeit nicht sichtbar sind. Diese Konfidenz ist über das Leap Motion Framework als Float-Wert abrufbar („The Leap Motion Controller“, 2015).

3.5.3 .NET Framework

Integriert in die Programmierumgebung „Visual Studio 2012“ wird für die Implementierung des Gesamtprototypen das .NET-Framework in der Version 4.5 als Basisframework verwendet. Das .NET Framework stellt Windowsplattform-abhängige Funktionen bereit, die für die Umsetzung des prototypischen Systems von Relevanz sind. Unter anderem werden Funktionen des .NET-Frameworks verwendet, welche Zugriffe auf das Dateisystem zur Aufzeichnung von Versuchsdaten ermöglichen.

3.6 Implementierung

Im folgenden wird die Implementierung des vorgestellten Konzeptes kurz erläutert. Es wird auf die wichtigsten Funktionen der praktische Umsetzung des prototypischen Systems eingegangen zu der die in den vorherigen Kapiteln beschriebenen

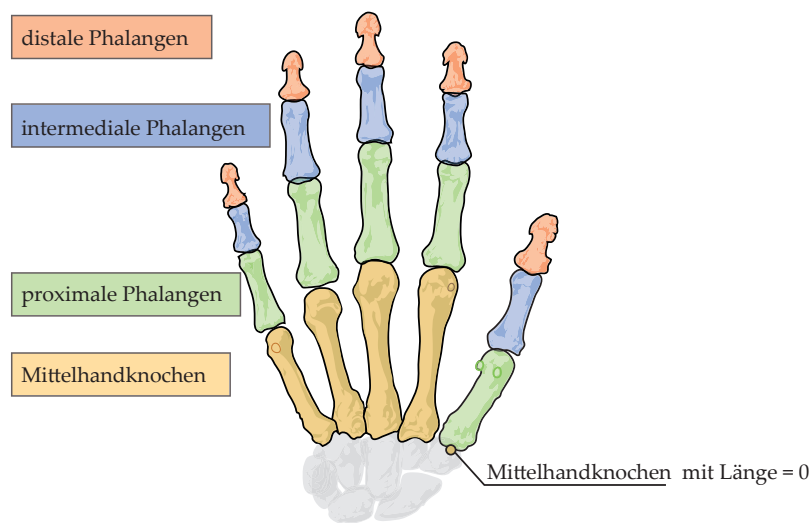


Abbildung 3.15: Grundlagenschema zum Aufbau des Handmodells der Leap Motion („The Leap Motion Controller“, 2015).

theoretischen Konzepte als Entwicklungsgrundlage verwendet werden. Der Entwicklungsprozess hat iterativ stattgefunden und wurde in zeitlichen Abständen sowie in verschiedenen Entwicklungsstadien einer Expertengruppe mit Expertenkenntnissen aus dem Bereich der HMI-Gestaltung für interaktive Seekarten und ECDIS-Systeme vorgestellt. Der in diesem Kapitel vorgestellte Stand der Implementierung beschreibt den Zustand des Systems, wie er zur Erhebung der empirischen Versuchsreihen aus den Kapiteln 4.2 und 4.3 vorgelegen hat.

3.6.1 Software-Architektur

Abbildung 3.16 stellt den Informationsfluss innerhalb der einzelnen Softwaremodule dar. Die Architektur der Software besteht aus verschiedenen Middleware-Elementen, die jeweils im Zusammenschluss Datenpakete aus Online- und Offlineinhalten verwalten. Als Onlineschnittstelle zum Abruf der AIS-Schiffsdaten, also der Daten, die für die Bereitstellung der Live-Positionsdaten des Schiffsverkehrs verwendet werden, wird eine vom Industriepartner verwendete Schnittstelle verwendet, die entsprechende Daten über einen Internetservice abrufen.

Das verwendete Kartenmaterial wird Offline von einer lokalen Datenbank abgerufen. Da das Kartenmaterial zunächst als zweidimensionaler Datensatz vorlag,

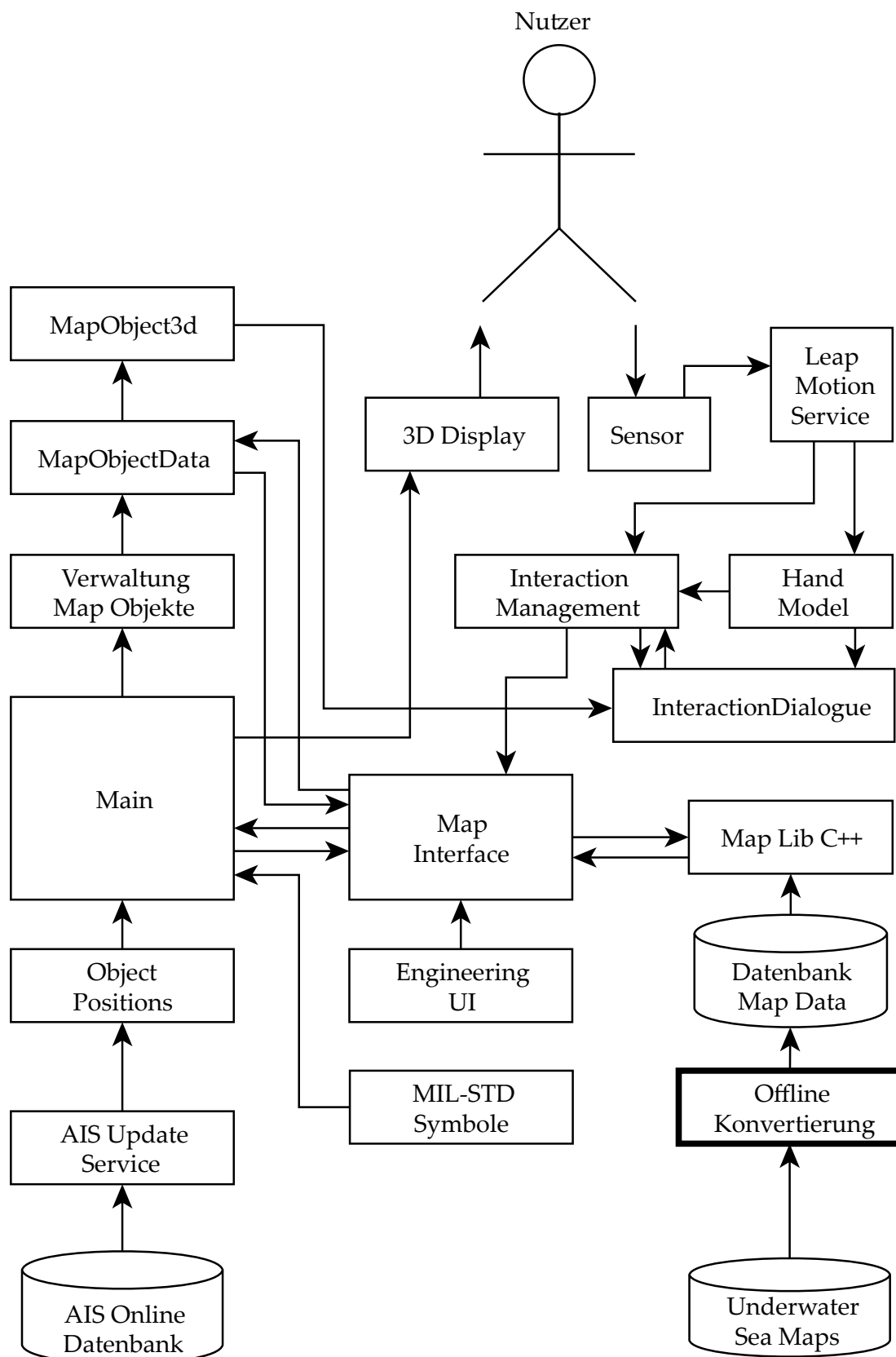


Abbildung 3.16: Informationsfluss der prototypischen Software

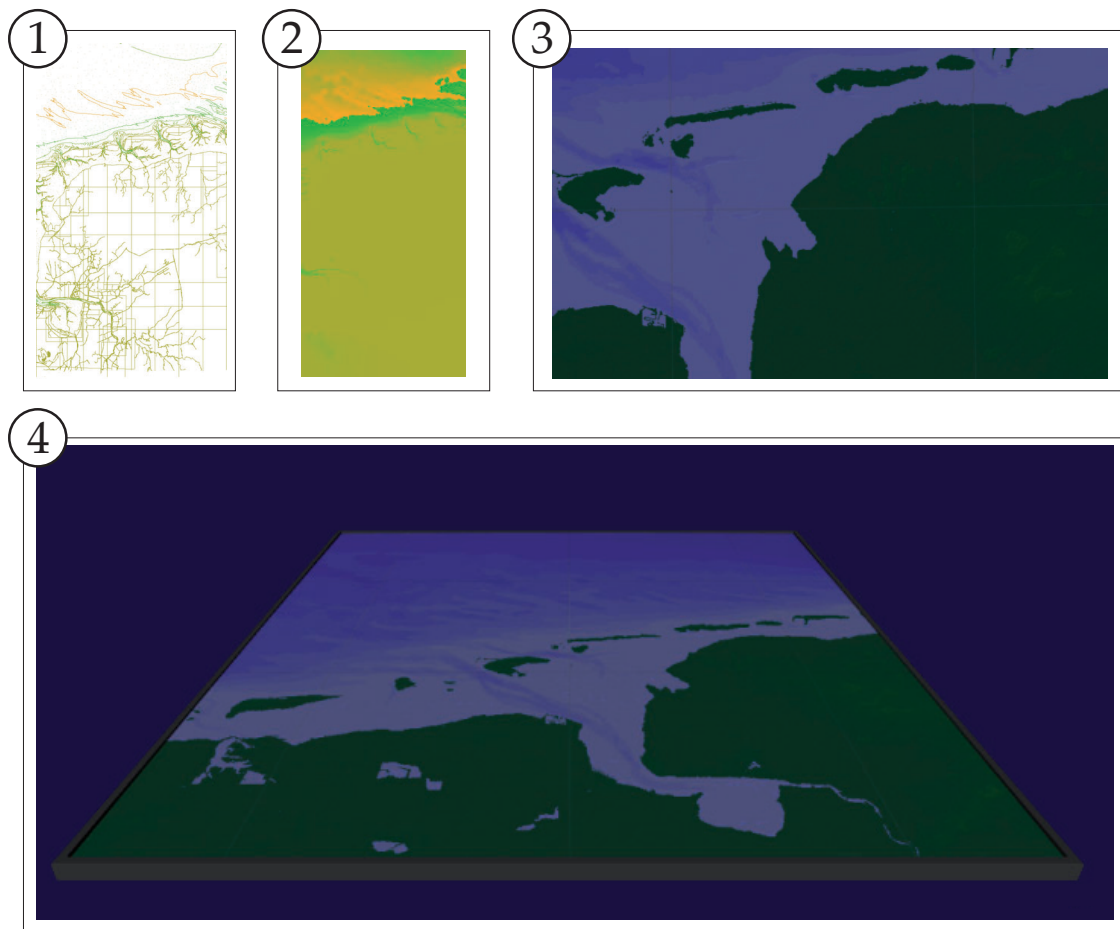


Abbildung 3.17: Workflow der Umkonvertierung des Kartenmaterials

bedurfte es vor einem möglichen Einsatz eines Workflows, der aus dem schematischen Höhenprofil eine sogenannte Heightmap erstellt. Eine Heightmap ist ein Array aus Positionsdaten mit einer zugehörigen Information über die Wassertiefe bzw. Landhöhe an der jeweiligen Position. Der Workflow ist schematisch in Abbildung 3.17 dargestellt.

3.6.2 Implementierung der Handmodelle

Die Darstellung einer Hand in der virtuellen Realität kann nach unterschiedlichen Ansätzen erfolgen. Die für diese Arbeit eingesetzte Sensorik des Leap Motion Sensors ermöglicht eine komplexe Darstellung der virtuellen Hand, da das verwendete Framework der Leap Motion ein virtuelles Grundgerüst eines Handmodells zur

Verfügung stellt, welches sich stark an der Anatomie der realen Hand orientiert. Um den in Kapitel 3.2 aufgestellten Anforderungen gerecht zu werden, wurden für die Umsetzung des Handmodells eine möglichst minimalistische Darstellungsvariante gewählt. Der grundsätzliche Aufbau der für den Prototyp eingesetzten Handmodelle unterliegt teilweise den Vorgaben des Leap Motion Softwareframeworks. Die jeweiligen Teile der Handknochen sind als Klassenhierarchie im Leap Motion Framework implementiert und werden über die Programmierschnittstelle aufgerufen. Darstellung und Proportionen des Handmodells können mit Vektortransformationen auf die gewünschte Umgebung angepasst werden. Der Aufbau orientiert sich sehr nah am biologischen Modell der menschlichen Hand, wie in Abbildung 3.15 dargestellt. Da der Daumen aus nur drei Gliedern besteht, jedoch der Einfachheit halber alle Eigenschaften eines „Fingers“ auf Softwareebene erbt, wird der metakarpale Knochen des Daumens im Modell mit der Länge null beschrieben. Die Darstellung des Daumens ist somit aus biologischer Sicht daher nur approximiert im Modell umgesetzt. Der Algorithmus der Leap Motion erkennt zusätzlich Werkzeuge, die in der jeweiligen Hand gehalten werden. Dies können Stab-artige Gegenstände sein, wie beispielsweise Stifte. Beim Durchlaufen der Handmodellldaten in der Softwareroutine werden die Daten entsprechend auf die Größe der Lagedarstellung normalisiert. Das „Leap Motion“-Framework stellt Geschwindigkeitsdaten für Entitäten wie die Indexfingerspitze bereit, welche für die Aktivierung des Interaktionsdialoges genutzt werden. Die Geschwindigkeit der Zeigefingerspitze wird in Millimeter pro Sekunde gemessen. Die Abfrage dieses Wertes wird für die Interaktion verwendet um unterschiedliche Schwellenwerte für die Interaktion mit Interaktionsdialogen zu untersuchen.

Die relevanten Daten für das Handmodell werden an die Klasse „Interaction Management“ überladen. In der Klasse „Interaction Manager“ wird die Kollisionsabfrage auf bestimmte Objekte durchgeführt, ausgehend vom Handmodell. Um Rechenleistung zu sparen, wird nur für die Objekte eine Kollisionsabfrage durchgeführt, welche für die Interaktion relevant sind. Durch den Filter können bestimmte Objekte in der Datenbank von Openinventor, und damit im Szenegraphen, identifiziert werden. Der interaktive Teil des Handmodells, die Indexfingerspitze, kann so erkannt und für die Interaktion mit weiteren Objekten eingesetzt werden. Zu diesen Objekten zählen mögliche Zielobjekte, die es zu treffen gilt oder Schaltflächen, welche einer Aktivierung bedürfen. Eine technische Beschreibung der Kollisionsabfrage in OpenInventor ist in 3.5.1 kurz dargelegt.

3.6.3 Implementierung des Interaktionsdialoges

Die Interaktionsdialoge werden als Inventorknoten, welcher in der Inventor-Datenbank und an einer bestimmten Position im Szenegraphen abgelegt werden, implementiert. Hierarchisch gesehen liegt die Position an dem Objekt, mit dem interagiert werden soll und erbt die entsprechenden Positionsdaten. Die Basis der hier verwendeten „Pie Menu“-Interaktion findet im Testsetting kontextbezogen statt. Über eine Distanzfunktion, welche stetig die Distanz zwischen Interaktionsobjekt und Indexzeigefingerspitze überprüft, wird unter einem Schwellwert ein Interaktionsdialog an einem interaktiven Objekt angezeigt. Je nach Interaktionsmöglichkeit am Objekt wird der Interaktionsdialog entsprechend generiert und parallel zur Sichtebene angezeigt.

3.6.4 Ergebnis der prototypischen Implementierung

Um auch eine dynamische Datenanzeige mit Realdaten zu ermöglichen, wurde eine vorhandene Schnittstelle eingesetzt, welches Daten aus einer Datenbank für den maritimen Schiffsverkehr über ein Webinterface abrufen kann und als Objekt in der Lagedarstellung zur Verfügung stellt. Diese Schnittstelle lag in Form eines .NET-Dienstes vor und konnte dadurch einfach in die prototypische Software integriert werden. In Abschnitt 2.2.3 wird kurz auf die Beschreibung der genutzten Daten eingegangen. Der maritime Schiffsverkehr wird über das Interface nicht aufgezeichnet sondern es werden lediglich Daten über das online zur Verfügung stehende Interface abgerufen. Die Daten werden mit einer entsprechenden Symbolik aus dem MIL-SYM-2525 Standard verknüpft, um in der maritimen Lagedarstellung als graphisches Symbol angezeigt zu werden. In Abbildung 3.18 sind Bildschirmfotos von der maritimen Lagedarstellung mit über MIL-SYM-2525 klassifizierten Objekten und einem aufgerufenen Kontextdialog dargestellt. Abbildung 3.20 zeigt den Ablauf, mit welchem kontextbezogene Informationen in der Lagedarstellung angepasst werden können.

In die stereoskopische Lagedarstellung können Punktwolkendaten als Openinventorknoten geladen und anschließend angezeigt werden. Bei Vorhandensein einer Georeferenzierung für jeden im Datensatz vorhandenen Datenpunkt ist eine korrekte, georeferenzierte Positionierung der Daten im System möglich. Abbildung 3.19 zeigt die prototypische Anzeige von einer nicht-georeferenzierten Punktwolke aus triangulierten, aktiven Sonardaten in der stereoskopischen Lagedarstellung.

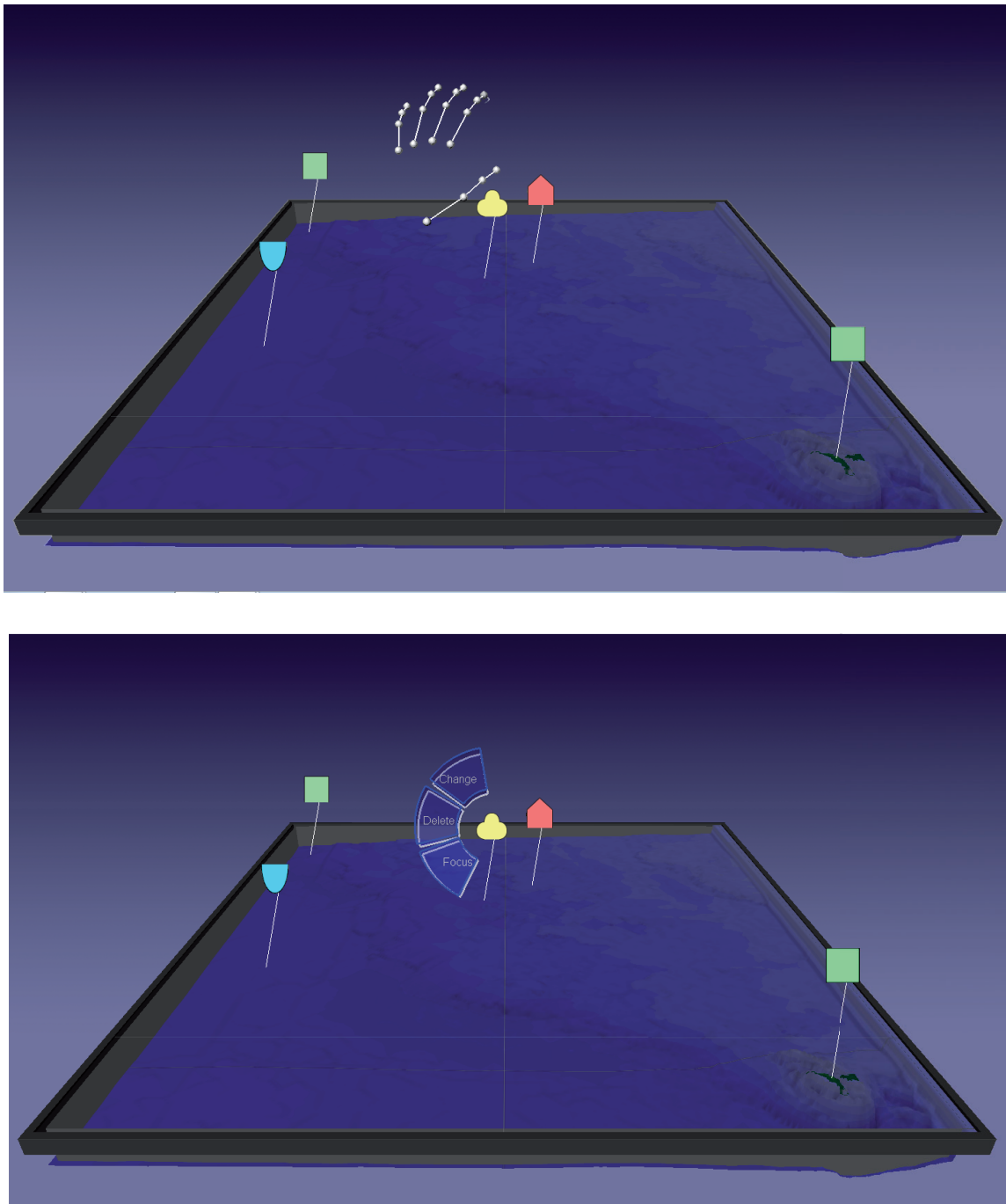


Abbildung 3.18: Oberes Bild: Handmodell als Interaktionsmedium zur Auswahl von Zielobjekt; Unteres Bild: Aktiviertes „Pie Menu“ an Zielobjekt

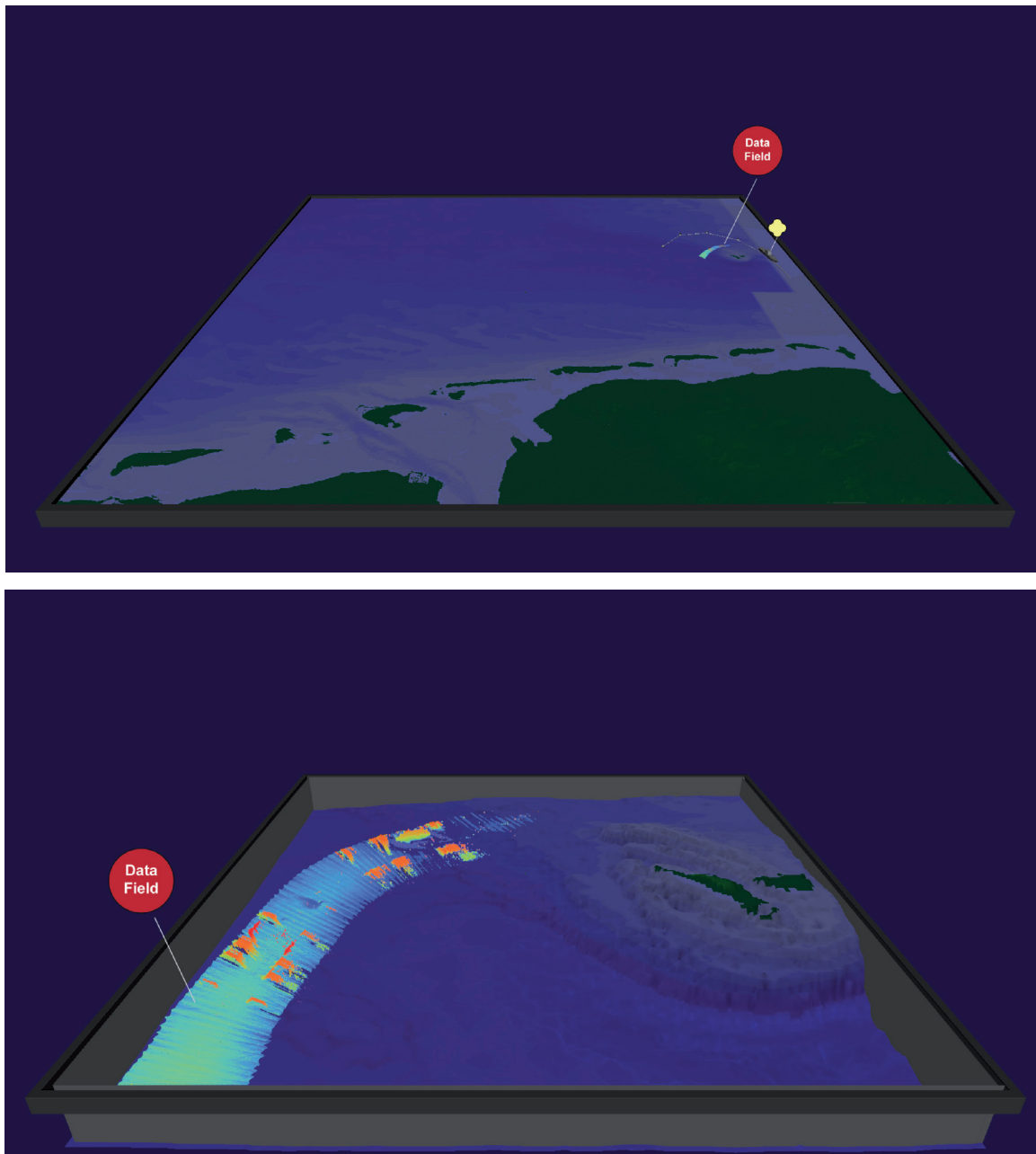


Abbildung 3.19: Kontext- und Lageansicht mit einer Punktwolke aus triangulierten Sonardaten in der stereoskopischen Lagedarstellung(vgl. Meyer und Dzaack (2015))

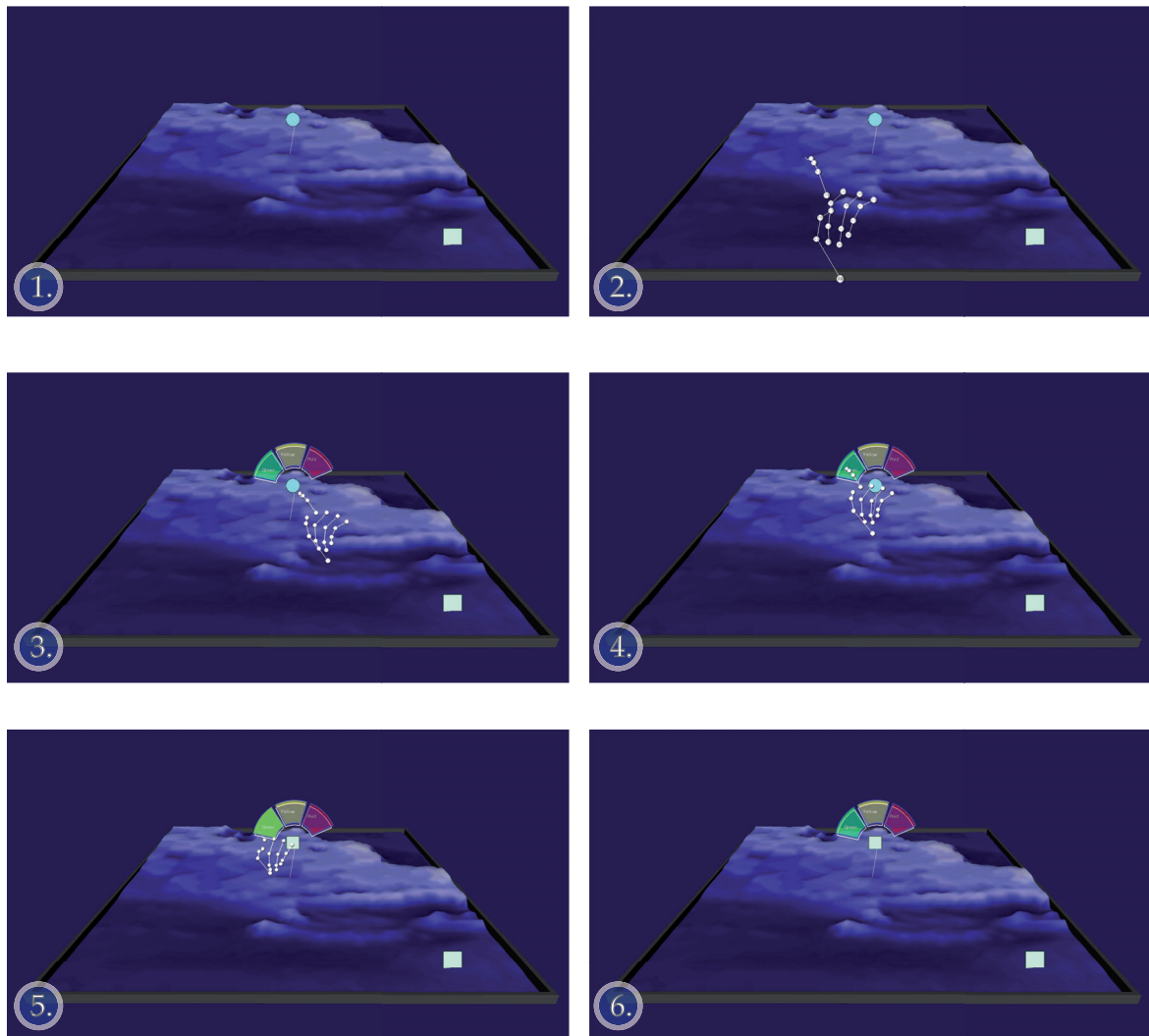


Abbildung 3.20: Ablauf eines Auswahl- und Statusänderungsprozesses für Kontakte auf der dreidimensionalen Seekarte

3.7 Forschungsfragen und Abgeleiteter Forschungsbedarf

Forschungsbedarf

Die Systemgestaltung und die Implementierung der Teilsysteme wurde auf Basis einer in Kapitel 3.1 beschriebenen Expertenbefragung durchgeführt. Eine stereoskopische Darstellung von Unterwasserdaten und gleichzeitiger Anzeige taktischer Daten, die eine hohe Informationsdichte aufweisen können, wurde von den Experten als unterstützend eingestuft. Die Experten machten ebenso deutlich, dass bei einer hohen Informationsdichte die Interaktion mit der virtuellen Welt einfach und intuitiv sein muss. Das Paradigma der naturalistischen Interaktion soll den Nutzer bei der Interaktion unterstützen, da die Interaktion in der Virtualität isomorphistisch, also basierend auf Metaphern aus der realen Welt, gestaltet werden kann. Es stellt sich dabei die Frage, welches darauf basierende Bedienkonzept für eine stereoskopische Desktopumgebung einsetzbar ist. Mit dem Einsatz treten möglicherweise Belastungsfaktoren für den Menschen auf, die bei der Ausführung von einfachen Tätigkeiten beanspruchend sein können. Dies sind zum Einen der Faktor Darstellung des Zeigewerkzeuges sowie die Ergonomie der Eingabe.

Aus der Systemgestaltung ergeben sich somit Forschungsfragen aus den Bereichen der Mensch-Computer-Interaktion sowie der ergonomischen Belastung und Beanspruchung, die bei der Systembenutzung auftreten. Da bei der Gestaltung der Interaktion ein Konzept verwendet wird, welches auf der sogenannten „naturalistischen Interaktion“ basiert, ist aus Sicht der Mensch-Computer-Interaktion zu untersuchen, ob die gewählte Interaktionsform vom Nutzer performant genutzt werden kann. Diese Fragestellung soll zum einen für das Handmodell als auch für die Gestaltung der Interaktionsdialoge untersucht werden, woraus sich die folgenden Forschungsfragen ableiten lassen:

1. Welche abstrakte Darstellung einer menschlichen Hand kann bei der Interaktion mit Daten in einer stereoskopischen Desktopumgebung ergonomisch eingesetzt werden?

Für die Datenmanipulation wurde ein Interaktionsdialogkonzept erstellt, welches zur Verwendung in einer stereoskopischen Desktopumgebung überprüft werden muss. Das System soll aus ergonomischer und arbeitswissenschaftlicher Perspektive

3. Entwicklung eines interaktiven stereoskopischen Systems zur Datenanzeige

untersucht werden. Zur Auslösung der Interaktionsdialoge wird das Handmodell aus der vorherigen Studie als Hauptinteraktionsmedium eingesetzt. Hieraus ergibt sich die folgende Forschungsfrage:

2. Welche Interaktionsform eignet sich für die Dialoggestaltung in stereoskopischen Desktopumgebungen und welchen Einfluss haben Ausrichtungsfaktoren bei der „Mid-Air“-Interaktion auf die Ergonomie?

Es werden einfache Aufgaben und Szenarien für die Untersuchung gewählt, aus denen sich leicht ein Bezug zu den aus den Expertengesprächen abgeleiteten Szenarien herstellen lässt. Eine zu hohe Aufgabengranularität soll vermieden werden, da durch Missverstehen der Arbeitsaufgabe durch hohe Komplexität Störfaktoren bei der ergonomischen Betrachtung auftreten können.

4. Empirische Untersuchungen

Um die Forschungsfragen im Allgemeinen und im Detail zu beantworten, wurden zwei empirische Untersuchungen durchgeführt. Die unterschiedlichen Visualisierungen des Handmodells basieren auf Daten, die von der Leap Motion bereitgestellt werden. In der ersten Versuchsreihe werden verschiedene Darstellungsvarianten eines Handmodells untersucht und bewertet. Das durch die ergonomische Bewertung in Versuchsreihe A ausgewählte Handmodell wird in der zweiten Versuchsreihe B als Zeigewerkzeug eingesetzt, um feinmotorische Bewegungen zur Interaktion mit Dialogstrukturen durchzuführen. Dazu werden theoretische und praktische Grundlagen der Interaktionsdialoggestaltung, wie in Kapitel 3.4.4 dargelegt, als Grundlage verwendet. Interaktionsmethoden werden hierzu miteinander verglichen und für jede Variante die ergonomische Beanspruchung bei der Benutzung objektiv sowie subjektiv erfasst.

4.1 Übergeordnete Methodik

Im folgenden Kapitel werden die empirischen Untersuchungen angewendete Methodik dargestellt. Es werden Haupt- und Vortests der abhängigen Variablen vorgestellt und ein Überblick über die angewendeten statistischen Verfahren gegeben. Weiterhin wird kurz der Einsatz der Fitts'schen Zeigaufgabe zur Validierung von Zeigebewegungen mit minimalistisch gestalteten Handmodelle beschrieben und auf Methoden zur Bewertung der Beanspruchung und ergonomischen Betrachtung bei „Mid Air“-Interaktion eingegangen.

4.1.1 Fitts'sche Zeigeaufgabe

Die Zeigeaufgabe nach Paul Fitts wird als Hauptelement für die erste empirische Untersuchung des prototypischen Systems eingesetzt. Dazu wird eine neutral aufgebaute Umgebung mit einem halbkreisförmigen Aufbau von unterschiedlich großen Zielobjekten hinzugezogen. Abbildung 4.4 zeigt diese Umgebung schematisch, in der drei verschiedene Ebenen, auf denen jeweils fünf kugelförmige Zielobjekte angeordnet sind, abgebildet sind. Die verschiedenen Ebenen der Zielobjekte wurden aufgrund der geringen Distanz zum Anzeigemedium mit negativer Parallaxe dargestellt. Die Anordnung der Objekte auf den verschiedenen Tiefenebenen wird bei der Auswertung mit berücksichtigt.

4.1.2 Pre- und Post-Tests

Im folgenden werden die Pre- und Posttests erläutert, die in den zwei durchgeführten Versuchsreihen verwendet wurden.

Das Wiener Testsystem: Motorische Leistungsserie

Zur Validierung der motorischen Fähigkeiten der einzelnen Versuchspersonen wurde vor Ausführung des Hauptversuches ein Leistungstest der Motorischen Leistungsserie des Wiener Testsystems durchgeführt. Die Motorische Leistungsserie ist eine Testbatterie die in Anlehnung an die von Edwin A. Fleishman entwickelten faktorenanalytischen Untersuchungen zur Feinmotorik entwickelt wurde (Fleishman & Ellison, 1962; Fleishman & Hempel Jr, 1954; Schuhfried, 2009). Erhoben wurden Daten zur Feinmotorik der rechten Hand unter Einbeziehung der Faktoren „Unruhe“, „Präzision“ und „Geschwindigkeit“. Für die Auswertung der Fleishman-Faktoren werden sogenannte T-Werte bestimmt. Die Berechnung dieser Werte führen zu einem Feinmotorik-Faktor, welcher Aufschluss über die motorischen Fähigkeiten des Versuchsteilnehmers gibt. Da die Feinmotorik auch situativ beeinflussbar ist, beispielsweise auch durch mangelnde Testmotivation, kann der Wert lediglich als Hinweis auf die motorische Leistungsfähigkeit angesehen werden. Nach Schuhfried (2009) geben T-Werte, welche überwiegend unter dem Durchschnitt der Vergleichsstichprobe ($T \leq 40$) liegen, Aufschluss darüber, ob die Möglichkeit einer Erkrankung im Sinne eines organischen Psychosyndroms besteht, oder, alternativ, andere Einflussfaktoren wie

fehlende Motivation zu schlechteren Testergebnissen geführt hat.

Sehtest

Um die Sehfähigkeit der Versuchsteilnehmer vor Versuchsantritt zu validieren, wurde der Sehtest „Rodatest 302“ der Firma Vistec verwendet. Getestet wurde Die Fähigkeit des Nahsehens bei einer Prüfdistanz von 80 Zentimetern. Neben der Fähigkeit des Farbsehens wurde auch die räumliche Sehfähigkeit der Versuchsteilnehmer validiert.

Rating Scale of Mental Effort

Die „Rating Scale of Mental Effort“ (engl. für „Bewertungsskala für Mentale Beanspruchung“ oder abgekürzt RSME), ist eine subjektive Skala zur Beurteilung der mentalen Beanspruchung einer Arbeitsaufgabe (Zijlstra, 1993). Direkt nach abgeschlossener Ausführung einer gegebenen Arbeitsaufgabe wird der Versuchsteilnehmer gebeten, die subjektive mentale Beanspruchung auf einer Skala von 0 bis 150 spontan zu nennen.

Borg Skala

Die Borg-Skala (Borg, Maibaum, Braun & Jagomast, 2001; Borg, 1982) wird als subjektive Skala zur Messung der physikalischen Beanspruchung eingesetzt. Dazu kreuzt der Versuchsteilnehmer nach Aufforderung auf dem ihm vorgelegten Bogen einen Wert zwischen sechs (überhaupt keine Anstrengung) und 20 (Grösstmögliche Anstrengung) an.

NASA TLX

Der NASA Task Load Index, oder NASA TLX, wird dem Versuchsteilnehmer nach erfolgreicher Absolvierung einer Testform in Papierform vorgelegt und ist ein von Hart und Staveland Hart und Staveland (1988) entwickelter Test, durch den in sechs Dimensionen die subjektiv erlebte Beanspruchung des Versuchsteilnehmers auf einer Skala von eins bis zehn erfasst werden. Ein nachfolgender Paarvergleich dient zur Gewichtung der einzelnen Dimensionen und zur abschließenden Integration in einen Gesamtscore. Diese Dimensionen sind:

- Geistige Beanspruchung

- Körperliche Beanspruchung
- Zeitliche Beanspruchung
- Aufgabenerfüllung
- Anstrengung
- Frustration

Auf den anschließenden Paarvergleich wurde in der Versuchsdurchführung verzichtet, eine Gewichtung der einzelnen Dimensionen wurde somit nicht vorgenommen und kein Gesamtscore errechnet. Stattdessen wurden die sechs Dimensionen als abhängige Variablen für jeweilige Einzelbewertungen herangezogen.

Simulator Sickness Questionnaire

Der „Simulator Sickness Questionnaire“ (engl.: Fragebogen zur Untersuchung auf die Simulatorkrankheit), oder abgekürzt SSQ (Kennedy et al., 1993) ist ein faktoranalytischer Fragebogen, der bestimmte pathogene Reaktionen der Versuchsperson bei der Benutzung von virtuellen Umgebungen erfragt. Da sich bei der Benutzung einer virtuellen Umgebung das Potenzial besteht, dass aufgenommene Reize im Widerspruch zueinander stehen, besteht die Möglichkeit einer Überreaktion des menschlichen Organismus, ebenfalls bekannt als „Motion Sickness“ (engl. Bewegungskrankheit). Ein solches Phänomen tritt vornehmlich in Flug- und Fahrsimulatoren auf, in denen beispielsweise ein vestibulärer Reiz des Innenohrs bei einem visuell wahrgenommenen Bewegungsimpuls vom menschlichen Wahrnehmungsapparat erwartet wird, dieser jedoch ausbleibt. Da es sich bei der Reaktion des Versuchsteilnehmers um akute Veränderungen des pathologischen Zustandes handelt, wird der Fragebogen dem Versuchsteilnehmer unmittelbar nach Benutzung der virtuellen Umgebung oder bereits *in situ* während Benutzung der virtuellen Umgebung vorgelegt. Nur so ist die Erfassung aller im Fragebogen enthaltenen Items sichergestellt. Die Simulatorkrankheit kann durch verschiedene Reize hervorgerufen werden, wie beispielsweise auch lineare Oszillation eines visuellen Reizes, durch visuelle Verzerrung, Flimmern und durch Reizwidersprüche von okulomotorischen und monokularen Tiefenhinweisen. Der Fragebogen wird auch verwendet, um eine Ermüdung des Sehapparates zu

testen, welche durch den Konflikt zwischen Vergenz und Akkommodation durch die stereoskopische Visualisierung auftreten kann.

Räumliches Vorstellungsvermögen

Für die Beurteilung des räumlichen Vorstellungsvermögens der Versuchsteilnehmer wurden in den Versuchsreihen zwei unterschiedliche Testreihen verwendet, die jeweils in einer der insgesamt zwei empirischen Studien durchgeführt wurden. Die räumliche Intelligenz gilt als ein gut abgesicherter Primärfaktor der Intelligenz. Im folgenden sind beide Testvarianten kurz beschrieben.

Würfelaufgaben des IST 2000 R Der von Amthauer, Brocke, Liepmann und Beauducel (2001) erstellte Intelligenz-Struktur-Test 2000 R ist eine Testreihe von papierbasierten Tests, um Intelligenz eines Versuchsteilnehmers zu quantifizieren. Die Testreihe ist in verschiedene Aufgabengruppen aufgeteilt, welche der Testreihe einzeln entnommen werden können. Die Bewertung der räumlichen Intelligenz ist über Würfelaufgaben gelöst. Dabei werden in der Aufgabe Würfel vorgegeben, auf denen auf jeder Seite bestimmte Muster abgebildet sind, drei Muster sind jeweils sichtbar. Dem Versuchsteilnehmer werden während des Tests verschiedene Lagepositionen eines Würfels gezeigt. Aufgabe des Versuchsteilnehmers ist herauszufinden, welcher von den gezeigten Würfeln den vorgegeben Würfeln entspricht. Die Auswahl der richtigen Würfel erfolgt unter Zeitdruck. Für die Auswertung werden die Anzahl richtiger, falscher und nicht bearbeiteter Aufgaben erfasst.

Würfeltest 3DW Der Dreidimensionale Würfeltest von Gittler (1990) ist ein spezialisierter Einzeltest für die Beurteilung des räumlichen Vorstellungsvermögens, oder „Spatial Ability“ und ähnelt in der Durchführung den Würfelaufgaben des IST 2000 R. Die Auswahl der richtigen Würfel erfolgt ebenfalls unter Zeitdruck. Für die Auswertung werden, wie bei der Bearbeitung der Würfelaufgaben des IST 2000 R, die Anzahl richtiger, falscher und nicht bearbeiteter Aufgaben erfasst.

4.1.3 Softwaremodul zur Zeit- und Datenerfassung

Um Zeitdaten in laufenden Versuchen und während der Benutzung der Software zu erfassen, wurde die prototypische Software um ein Zeiterfassungsmodul erweitert.

Für die Implementierung dieses Moduls werden Teile der Middleware Open Inventor 9.3 und Teile des Microsoft .NET-Frameworks verwendet. Die Zeitmessung wird mittels Zeittaktgeber, welcher in der Computerhardware verbaut ist, durchgeführt und erfasst Zeit in Millisekunden. Die Zeitmessung wird für jede Versuchsdurchführung entsprechend ihrer Notwendigkeit konfiguriert, so dass eine präzise Zeitmessung für die Ausführung einzelner Konditionen erfolgen kann.

4.1.4 Körperliche Belastungs- und Beanspruchungsmessung

Bei der Benutzung von freihändigen Eingabesystemen wird der Hand-Arm-Apparat eines Nutzers erhöhten Beanspruchung ausgesetzt (Hincapié-Ramos, Guo, Moghadasian & Irani, 2014). Werden die entsprechende Beanspruchung zu groß, kann dies die Erfüllung der Arbeitsaufgabe negativ beeinflussen und zu Ermüdungserscheinungen des Hand-Arm-Apparates führen. Um eine ergonomische Betrachtung im Bezug auf die physische Beanspruchung durch das Eingabesystems auf den menschlichen Hand-Arm-Apparat zu betrachten, können unterschiedliche Messverfahren eingesetzt werden. Subjektive Messverfahren wie die „Borg RPE“-Skala und der „NASA TLX“ werden in Abschnitt 4.1.2 ausführlicher beschrieben. Des weiteren sind für die objektive Betrachtung der muskulären Beanspruchung während der Benutzung eines gestischen Eingabesystems elektromyographische Messungen vorgesehen. Die Bewertung der körperlichen Beanspruchung wird in Versuchsreihe B (siehe 4.3) mithilfe von elektromyographischen Messungen auf der Hautoberfläche an beteiligten Muskelgruppen durchgeführt und als Belastungsmaß für die ergonomische Bewertung der Einzelkonditionen verwendet. Zusätzlich wird die subjektive Belastung und Beanspruchung in Versuchsteil B über den NASA TLX Fragebogen erfasst (Hart & Staveland, 1988), wobei auf den Paarvergleich der einzelnen Dimensionen im NASA TLX verzichtet wird und einzeln ausgewertet werden. Das Ziel der Messung der subjektiven und objektiven Beanspruchung des Nutzers auf geistiger und körperlicher Ebene ermöglicht eine ergonomische Bewertung des Teilsystems. Da verschiedene Möglichkeiten der Bedienung des Interaktionsdialoges als unabhängige Variablen miteinander verglichen werden, zielt die Messung der Belastung und Beanspruchung auf die Auswahl der ergonomisch günstigsten Variante ab. Als Konzept der Belastung und Beanspruchung werden Definitionen von Kirchner (Roh-

mert, 1984) herangezogen, der auf vorangehenden Arbeiten von Rohmert (1984) das Belastungs-Beanspruchungskonzept als Konzept zur Untersuchung der Wirkung von vorliegenden Tätigkeiten auf den Menschen erstellte. stellte 1984 das vereinfachte Belastungs-Beanspruchungskonzept vor, in dem Belastung bei Ausführung der Arbeitsaufgabe als Ursache sowie die Beanspruchung, z.B. auf Muskulatur, während der Ausführung einer Arbeitsaufgabe als Wirkung dargestellt sind. In der Arbeitswissenschaft werden demnach die Einwirkungen aller äußeren Kräfte auf die Arbeitsperson als Belastung verstanden (Schlick et al., 2010, S. 38 ff.). Eine Abgrenzung der Begriffe „Belastung“ und „Beanspruchung“ wurde von Kirchner (Rohmert, 1984) nach Laurig (Rohmert, 1984) vorgenommen:

„**Beanspruchung** bedeutet die Gesamtheit der durch die individuellen Eigenschaften des einzelnen Menschen bedingten in diesem und für diesen entstehenden Auswirkungen der Arbeit und der Situation (nach Laurig, 1979). Beanspruchung bezeichnet demnach die spezifische Inanspruchnahme des Menschen durch die Arbeit und die Situation.“

„**Belastung** bedeutet die Gesamtheit der bei einer Arbeit direkt oder indirekt bestehenden oder entstehenden Bedingungen, die Auswirkungen auf den Menschen haben können (nach Laurig, 1979).“

Nach Rohmert können bei der Muskelarbeit bestimmte Engpässe vorliegen, die es zu ermitteln gilt. Da bei der Interaktion im freien, stereoskopischen Raum eine starre Haltung des Armes in der Luft vorliegt, und sowohl kleine als auch große Bewegungen des Hand-Arm-Apparates ausgeführt werden, so ist zu vermuten, dass dieser Engpass in der Rücken- und Armmuskulatur liegt, die bei einer entsprechenden Dauerzwangshaltung ermüdet. Die Beanspruchung dieses Muskelapparates wird durch elektromyographische Messungen ausgewählter Muskelpartien genauer untersucht. Vor der Untersuchung werden Analysefragen definiert (nach Konrad (2005a)), die bei der späteren Auswertung helfen, eine Einordnung der EMG-Messung im Gesamtkontext für die Ergonomiebewertung vorzunehmen:

1. Ist der Muskel aktiv?
2. Ist der Muskel mehr oder weniger aktiv?

3. Wann ist der Muskel an/aus?
4. Wie stark ist der Muskel aktiv?
5. Ermüdet der Muskel?

Die Analysefragen sind wie folgend zu beantworten:

1. Qualitative Beurteilung/Rangfolgen (Nominal)
2. Qualitative Beurteilung/Rangfolgen (Ordinal)
3. Onset und Offset Kalkulation, Firing Orders (Metrisch)
4. Bewertung in % MVC (Metrisch)
5. Regressions und Trendanalysen (Metrisch)

Für die Auswertung der für die Versuchsreihe B geplanten Datenaufzeichnung wird eine metrische Analyse für die Bewertung der aufgebrachten muskulären Belastung in % MVC, also in Prozent von der maximal leistbaren Muskelkraft, angestrebt. Um diese Fragen zu klären, wird von Konrad (2005a) für jede Frage ein vorbestimmter Antworttypus empfohlen. Für die Fragestellung der Bewertung der Muskelkraft in % MVC ist die Frage wie stark der jeweilige Muskel zum Zeitpunkt der Messung aktiv war. Um eine Normierung der Messergebnisse durchführen zu können, wurden mit den Versuchspersonen Maximalkrafttests für jeden erfassten Muskel individuell durchgeführt. Der über die Oberflächen-Elektromyographie maximal festgestellte Wert wurde als maximaler Kraftwert festgehalten und bei der Auswertung verwendet, um die muskuläre Beanspruchung relativ zur maximal möglichen Anspannung der jeweiligen Muskeln zu berechnen und die Messwerte zu normieren. Die Auswahl der jeweiligen Muskeln ist in Abbildung 4.1 abgebildet.

4.1.5 Versuchsanordnung

In den zwei durchgeführten Versuchsreihen wurden jeweils Teilbetrachtungen des Gesamtsystems evaluiert. In beide Versuchsreihen werden die gleiche Ein- und Ausgabehardware verwendet. Da die erste Versuchsreihe als Teilversuch zur Auswahl eines geeigneten Handmodells durchgeführt wurde, ist für die zweite Versuchsreihe eine entsprechende Auswahl getroffen bezüglich des Handmodells getroffen worden, mit dem die Versuchsreihe B durchgeführt wurde.

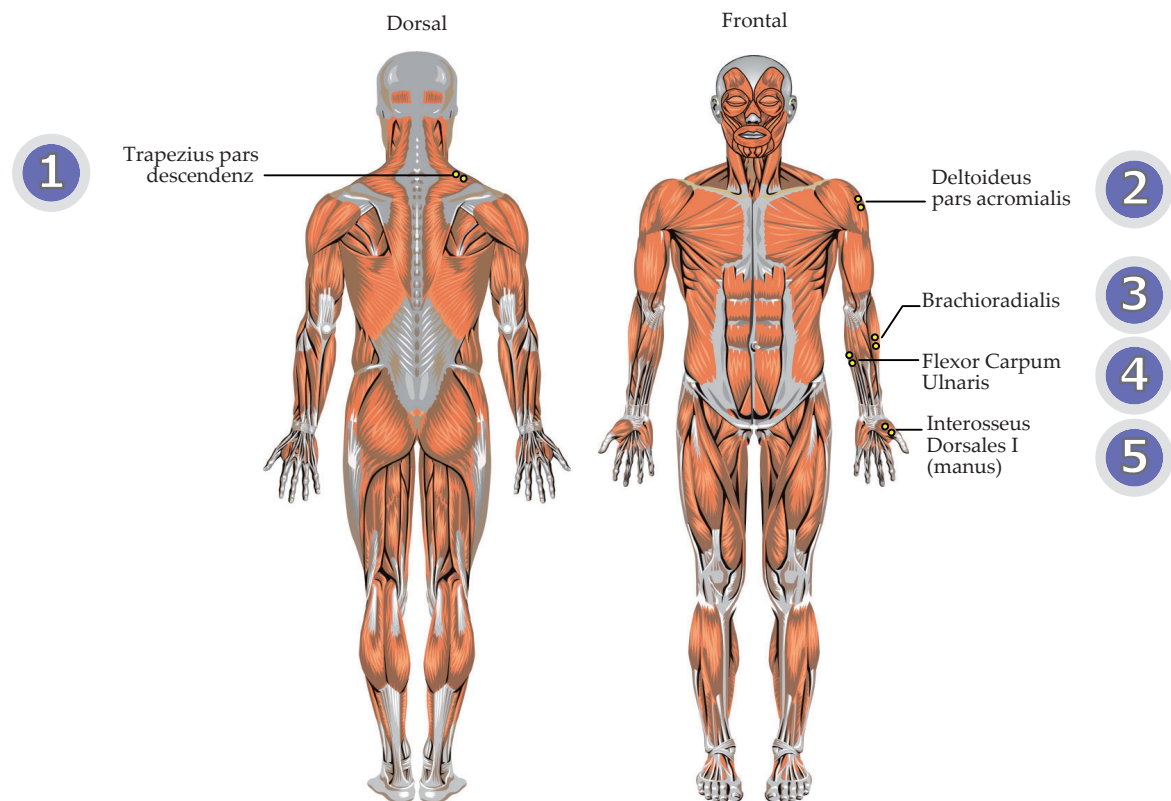


Abbildung 4.1: Darstellung der ausgewählten Muskeln zur physiologischen Betrachtung der muskulären Beanspruchung (nach Konrad (2005a), angepasste Darstellung)

4.1.6 Versuchsprototyp

Die prototypische stereoskopische Seekarte ist Hauptgegenstand der durchzuführenden Untersuchungen. Da jedoch nicht nur die Interaktionsumgebung, sondern auch das Interaktionsmedium selbst Gegenstand der Untersuchung ist, muss eine Variante aus dem fertigen Prototyp erzeugt werden, in dem stereoskopisch visualisierte Seekarte und Interaktionsmedium voneinander getrennt dargestellt werden können. Die Seekarte lässt sich zu diesem Zweck in der Visualisierung einfach deaktivieren bzw. ausblenden.

Stereoskopisches Anzeigesystem Für die Anzeige wurde der stereoskopische Monitor ASUS VG27AH mit einer Größe von 27" mit zeilenweisem polarisiertem Lichtfilter eingesetzt. Die prototypische Software wurde auf einem Laptop mit dedizierter nVidia-Grafikarte, Modell K3000M, ausgeführt. Die Displayauflösung betrug 1920 x 1080 Bildpunkte. Das Maß der darstellbaren Pixelfläche beträgt 597,12 mm in der Breite sowie 335,88 mm in der Höhe, der Pixelabstand des eingesetzten Anzeigesystems beträgt 0,311mm und die Reaktionszeit von Grau zu Grau liegt beim verwendeten Modell bei 5ms. Eine langsamere Reaktionszeit hätte bei der Betrachtung von schnell bewegten Objekten auf der Anzeige für sogenannte Schlierenbildung gesorgt, dies hätte möglicherweise zu einer Verstärkung der Wahrscheinlichkeit des Auftretens der Simulatorkrankheit geführt. Die Anzeigehelligkeit betrug $250\text{cd}/\text{m}^2$.

Bei der Betrachtung der virtuellen Umgebung entstand den Betrachter der leeren Versuchsumgebung der Eindruck eines leeren Raumes, in dem lediglich ein grau-blauer Gradient als Hintergrund zu sehen war, für die jeweiligen Versuchsreihen wurden der Umgebung die Versuchsobjekte hinzugefügt.

Zielobjektgrößen können nun bei Kenntnis der Pixelgröße über die Winkelfunktion 4.1 bestimmt werden, die in der DIN EN ISO 9241-303 9241-303 (2012) ebenfalls verwendet wird, um die Ergonomie von Schriftgrößen auf Bildschirmgeräten zu gewährleisten.

$$\tan \frac{\alpha}{2} = \frac{h}{2d} \quad (4.1)$$

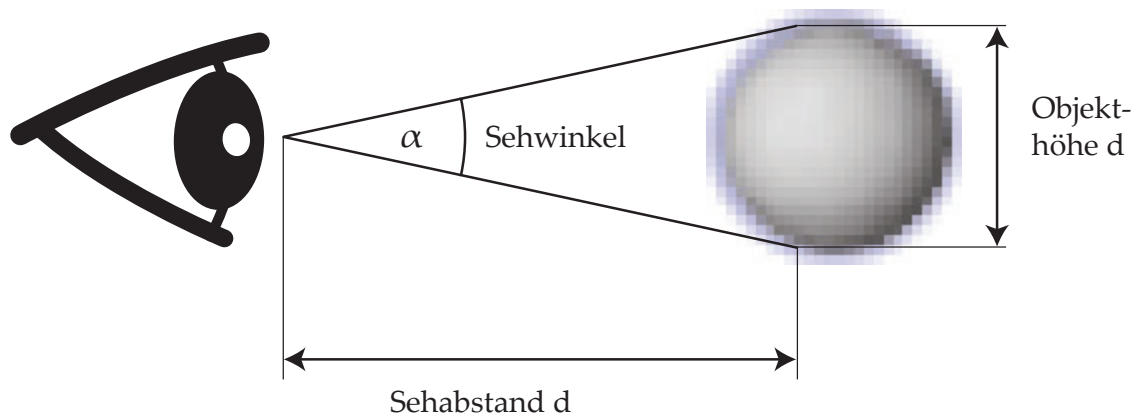


Abbildung 4.2: Bestimmung der Objektgröße

4.1.7 Statistische Datenauswertung

Die Datenerfassung während des Versuches erfolgte direkt über in die Software implementierte Daten- und Zeiterfassungsmodule, die mithilfe des .NET-Frameworks implementiert und in .csv-Dateien¹ während der Laufzeit im Dateisystem des Betriebssystems gespeichert wurden. Jedes aufgezeichnete Datum wurde mit einem Zeitstempel versehen. Um die erhobenen Messdaten zu analysieren, werden statistische Verfahren der parametrischen Statistik angewandt. Die Hauptversuche werden neben deskriptiver Statistik mit einer multifaktoriellen Varianzanalyse (ANOVA) mit Messwiederholung auf den Innersubjektfaktoren ausgewertet. Aufgrund der Stichprobengröße in Versuchsreihe A 4.2 > 30 Teilnehmern, bedarf es für die Berechnung der Varianzanalyse einer Prüfung der notwendigen Voraussetzungen. Um eine Varianzanalyse durchführen zu können, müssen die Messwerte der Stichprobe eine normalverteilte Grundgesamtheit aufweisen (Bortz, 2013; Field, 2013)). Um sicher zu stellen, dass dieses Kriterium erfüllt wird, wurden die Daten mit Kolmogorow-Smirnow-Tests oder Shapiro-Wilk-Tests überprüft. Wird das Kriterium der Normalverteilung weiterhin verletzt, so kann für kleine Stichprobengrößen auf nicht-parametrische statistische Verfahren ausgewichen werden. Für Stichproben unter 30 Versuchsteilnehmern besteht dazu die Möglichkeit, den Friedman-Test zu verwenden. Dieser Test gilt als nicht-parametrische Alternative für wiederholte Messungen (Field, 2013, S. 573 ff.). Für Verletzungen der Normalverteilung bei Stichproben von Größen von

¹csv steht für „Comma Separated Values“ (engl.), zu Deutsch „Durch Kommata-getrennte Werte“: Einfaches Datenformat zur Erstellung von Tabellen.

über 30 Teilnehmern gilt die Varianzanalyse weiterhin als robust. Nach Bortz und Schuster ([2010] 2010) besteht keine Veranlassung, auf die Anwendung eines Tests zu verzichten, insofern dieser sich weiterhin als robust erweist. Die Annahme der Normalverteilung wird für jede Stufe der Innersubjektfaktoren zwar als Voraussetzung zur Anwendung der Varianzanalyse mit Messwiederholung genannt, jedoch von vielen Forschern als unwichtige Voraussetzung für die Durchführung einer ANOVA eingestuft. Schmider, Ziegler, Danay, Beyer und Bühner (2010) haben die Robustheit der ANOVA auf Verletzung der Annahme auf Normalverteilung untersucht. Bei einem Vergleich der Ergebnisse für die Berechnung der ANOVA für verschiedene Arten der Verteilung konnten Schmider et al. (2010) die Robustheit der ANOVA nachweisen. Die empirischen Fehlertypen I und II blieben jeweils unter der Verletzung verschiedener Verteilungen konstant. Über eine Regressionsanalyse wurde der Faktor „Art der Verteilung“ als nicht-signifikant für die Erklärung der durch die berechneten Ergebnisse der ANOVA eingestuft. Die ANOVA kann bei Verletzung der Annahme auf Normalverteilung der Innersubjektfaktoren trotzdem verwendet werden und liefert zuverlässige Ergebnisse (Schmider et al., 2010). Die Versuchsdesigns von Versuchsreihe A und B sind als faktorielles Design mit Messwiederholung konzipiert. Für die Durchführung der ANOVA müssen die Datensätze auch auf Sphärizität überprüft werden. Dazu wird der Mauchly-Test verwendet. Mauchly's Test untersucht die Annahme, dass Abweichungen der Unterschiede zwischen Bedingungen gleich sind (Field, 2013). Fällt dieser Test also signifikant mit $p \leq 0.05$ aus, so ist davon auszugehen, dass deutliche Unterschiede zwischen den Varianzen der Unterschiede existieren und damit keine Sphärizität der Daten gegeben ist. Sollte die Nullhypothese für diesen Test verworfen werden, so besteht die Möglichkeit Korrekturverfahren nach Greenhouse-Geisser oder Huynh-Feldt anzuwenden. Entsprechend wird bei der statistischen Datenauswertung vorgegangen. Liefert die ANOVA signifikante Ergebnisse, so werden, abhängig von der Hypothese, Post-hoc Tests durchgeführt, welche als paarvergleichende T-Tests an die ANOVA angeschlossen werden. Die statistische Datenauswertung erfolgte mittels Software SPSS Statistics 23 und Microsoft Excel.

Boxplots und Ausreißer

Die Möglichkeit zur gleichzeitigen Veranschaulichung von zentraler Tendenz und Variabilität einer Verteilung bietet der von Tukey (1977) eingeführte Boxplot (Bortz, 2013). Ein Darstellungsbeispiel für einen Boxplot ist in Abbildung 4.3 dargestellt. Die grundlegende Idee des Aufbaus eines Boxplot ist die Darstellung der mittleren 50% eines Datensatzes innerhalb der sogenannten „Box“ zu repräsentieren. In die Box wird der Median als horizontaler Strich eingezeichnet, die verbleibenden zwei Quartile werden jeweils als sogenannte „Whisker“ dargestellt. Dies sind die jeweils vom Ende oberhalb und unterhalb der Box ausgehenden Striche, die den Wertebereich des unteren sowie oberen Quartils darstellen.

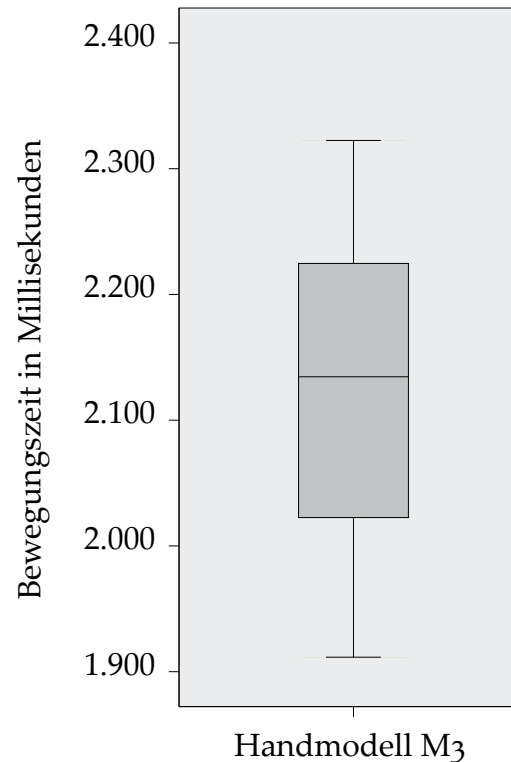


Abbildung 4.3: Boxplot nach Tukey (1977)

Die Berechnung der Länge der sogenannten „Whisker“ wird wie folgend nach Bortz (2013) durchgeführt. Es wird zuerst der sogenannte Interquartilbereiches (IQR) bestimmt. Nun wird das 1,5 fache zum äußeren Rand des IQR hinzu addiert. Nach Tukey (1977) spricht man dabei auch von der Berechnung der „obere Ausreißergrenze“. Die Zeichnung des „Whisker“-Charts wird nun bis an die Grenze vorgenommen, alle weiteren Werte, die über bzw. unter dieser Grenze liegen, werden als Ausreißer betrachtet. Die Länge jedes Teils des „Whiskers“ kann das 1,5-fache des Interquartilbereiches nicht über- bzw. unterschreiten. Die nach Tukey (1977) beschriebene Methode kann verwendet werden, um Ausreißer in großen Datenmengen vor der Weiterverarbeitung zu identifizieren und zu berechnende Mittelwerte durch eine begrenzte Zahl von Ausreißern nicht zu stark zu beeinträchtigen (Bortz, 2013, S. 44 ff.). Diese Methode wird auf Versuchsdaten von Versuchsreihe A und Versuchsreihe B verwendet, um Ausreißer aus den Versuchsdaten zu entfernen.

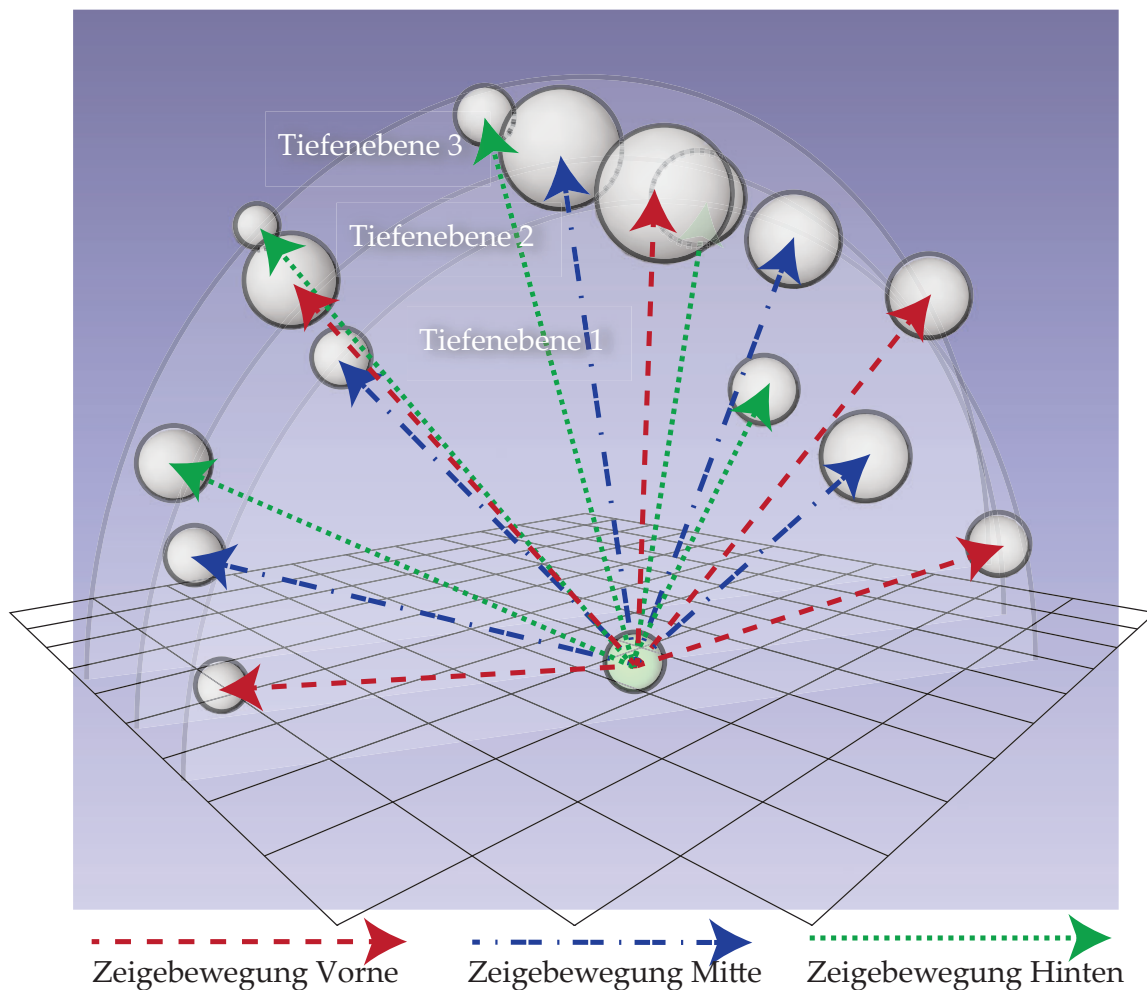


Abbildung 4.4: Schematische Darstellung der Zeigebewegungen im dreidimensionalen Raum (vgl. Meyer, Bützler, Dzaack und Schlick (2016))

4.2 Versuchsreihe A

Zur Gestaltung des prototypischen stereoskopischen Systems zur Datenanzeige und Interaktion wurden Empfehlungen aus der Literatur abgeleitet und bei der Umsetzung des prototypischen Systems berücksichtigt. Die Grundlagen zur stereoskopischen Terrainvisualisierung wurden aus der Literatur übernommen und im prototypischen System verwendet (Porathe, 2006). Es ergeben sich weitere wissenschaftliche Fragestellungen bei der hier getroffenen Wahl der Interaktion mit dem prototypischen System. Da die Interaktion mit dem System mit einem virtuell dargestellten Handmodell erfolgen soll, welches die Datenanzeige selbst nicht

behindern oder verdecken darf, ist eine möglichst minimalistische Darstellung eines Handmodells zu gewährleisten. Gleichzeitig darf die Darstellung jedoch nicht zu abstrakt gewählt sein damit bei der Betrachtung des Handmodells noch ausreichend Immersion des Nutzers in das virtuelle System bestehen bleibt und die Steuerung der virtuellen Hand intuitiv vom Nutzer verstanden werden kann. Da Zeigebewegungen als wichtiger Teil des Interaktionskonzeptes zur Bedienung der dreidimensionalen Darstellung dienen, muss ebenfalls bewertet werden, ob Zeigebewegungen im dreidimensionalen Raum mit einer minimalistischen Handdarstellung durchführbar sind. Da auch die Größe der Zielobjekte eine Rolle spielt, werden im Versuch unterschiedliche Zielgrößen untersucht. Zur Bewertung der unterschiedlichen Darstellungsvarianten des Handmodells und zur Zeigepersistenz auf Ziele mit unterschiedlichen Größen wurde als die Hauptaufgabe in Versuchsreihe A die Durchführung einer Fitts'schen Zeigaufgabe auf kugelförmige Zielobjekte gewählt. Bei Gestaltung der Studie wurde nicht davon ausgegangen, dass es motorische Unterschiede bei der Bedienung des Eingabesensors geben würde, stattdessen leiten sich die Hypothesen aus den verschiedenen Darstellungsvarianten des Handmodells und aus den unterschiedlichen Zielgrößen der Kugelobjekte ab. Die Versuchsaufgabe war so gestaltet, dass der Versuchsteilnehmer eine ballistische Bewegung mit der eigenen Hand Raum durchführen sollte. Diese Bewegung wurde 1:1 auf die virtuelle Hand in der stereoskopischen Desktopumgebung übertragen. Im virtuellen System waren kugelförmige Objekte angeordnet, die vom Versuchsteilnehmer mit der Zeigefingerspitze des virtuellen Handmodells getroffen werden mussten. Mittig war ein Startobjekt angeordnet, welches als erstes getroffen werden musste, um ein weiteres Zielobjekt zu aktivieren. Eine schematische Darstellung der Zielobjekte im virtuellen Raum ist in Abbildung 4.4 zu sehen. Durch die Wahl kugelförmiger Zielobjekte wirkten die Zielobjekte bei der Betrachtung zweidimensional, das zu treffende Objekt dreidimensional.

Es war nur das Startobjekt und Zielobjekt zur gleichen Zeit sichtbar. Das zu berührende Objekt war jeweils mit einem grünen Shader belegt, um aktiven Objekten Salienz zu verleihen.

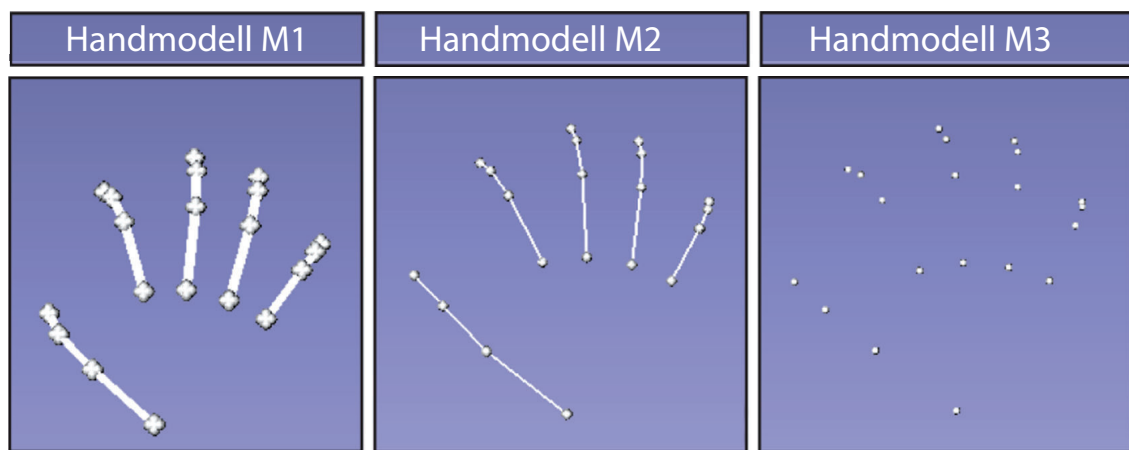


Abbildung 4.5: Darstellung der minimalistisch gestalteten virtuellen Handmodelle (vgl. Meyer, Bützler, Dzaack und Schlick (2016))

4.2.1 Ziel und Methodik

Voruntersuchungen haben gezeigt, dass anthropomorphe Bewegungen in der virtuellen Realität Nutzern eine Hilfestellung zur Erkennung von sogenannten biologischen Bewegungen sein können (vgl. Kapitel Literaturneuroergonomiehandmodelle). Durch neue Trackingverfahren können Abbilder der menschlichen Hand in Echtzeit in ein virtuelles System direkt übertragen werden und mit ihnen auch die Bewegung der menschlichen Hand auf ein virtuelles Modell. Im eingesetzten Versuchsprototyp wird der Leap Motion Sensor eingesetzt, um ein entsprechendes Ergebnis zu erzielen. Mit der direkten Übertragung auf ein präzises Modell der menschlichen Hand ist auch das Kriterium der biologischen Bewegung theoretisch erfüllt. Durch die Betrachtung eines Handmodells, auf welches die Handbewegungen des Nutzers übertragen werden, kann zusätzliche Immersion in das virtuelle System entstehen. In Versuchsreihe A sollen Visualisierungen für Handmodelle gefunden werden, die den Kriterien der in den Experteninterviews erhobenen Anforderungen möglichst entsprechen. Die Visualisierung des Handmodells soll gewährleisten, dass bei der Interaktion mit dem prototypischen System, dessen Konzept in Kapitel 3.4 beschrieben ist, keine oder möglichst wenig Information auf einer komplexen stereoskopischen Seekarte verdeckt wird. Untersuchungen von Perani et al. (2001) haben ergeben, dass die Visualisierung einer menschlichen Hand in einem virtuellen System aus neurologischer Sicht ähnliche Hirnaktivitätsmuster hervorruft, wie bei der Betrachtung einer

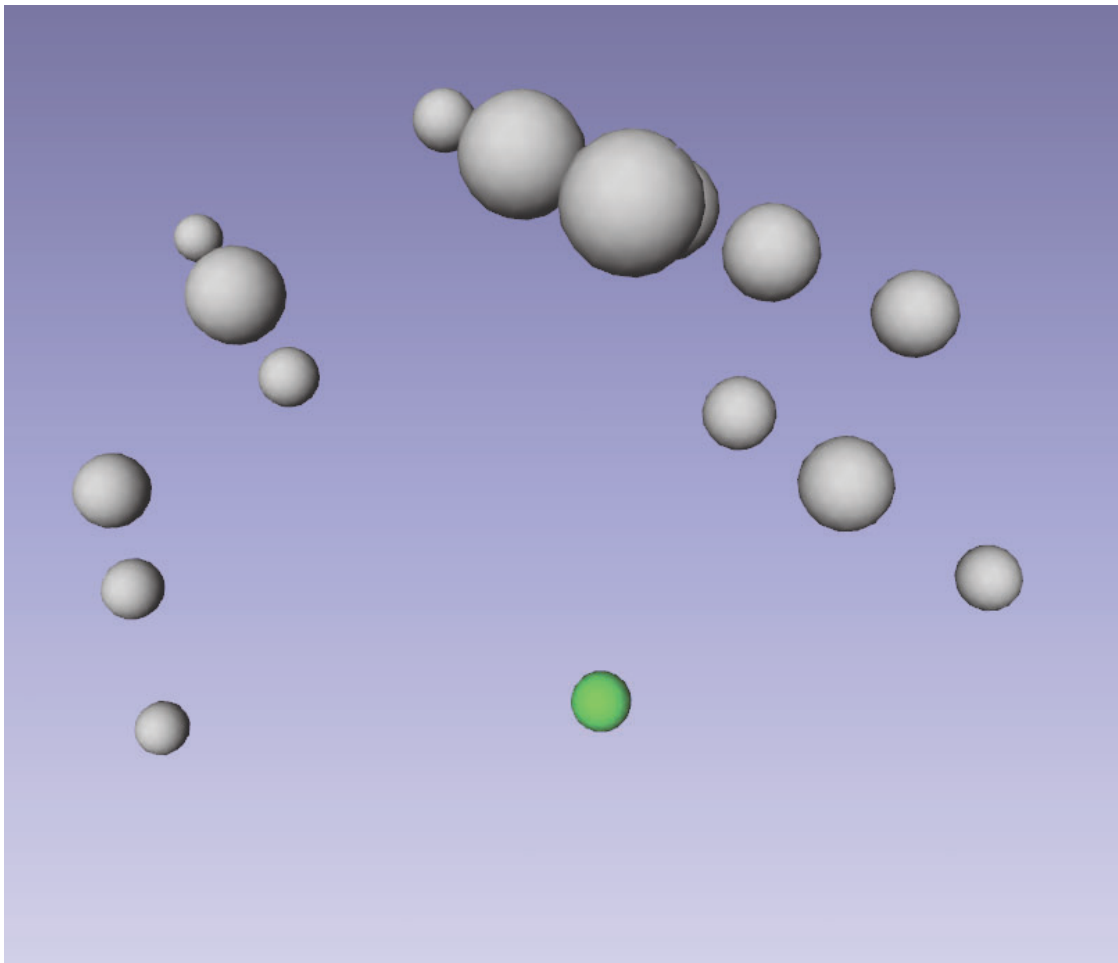


Abbildung 4.6: Screenshot der virtuellen Versuchsumgebung: Alle Zielobjekte gleichzeitig sichtbar

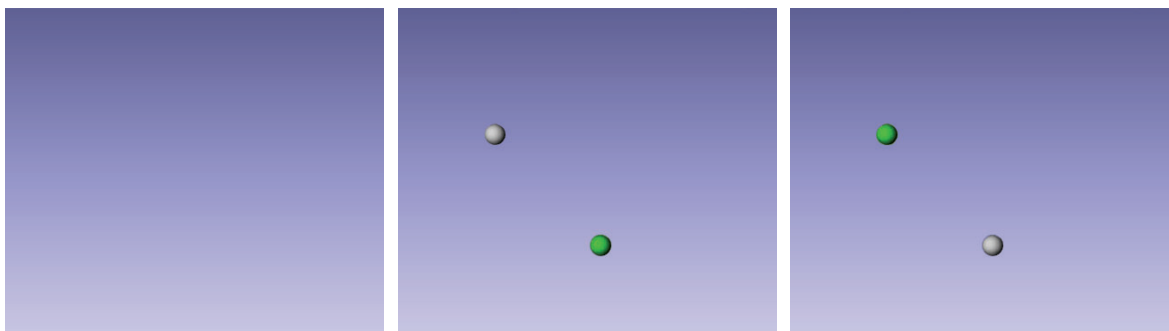


Abbildung 4.7: Screenshot der Umgebung mit virtuellen Zielobjekten, links: Leere Umgebung mit Hintergrundgradient; Mitte: Startobjekt aktiv; Rechts: Zielobjekt aktiv.

virtuellen Modellhand, insofern die Modellhand sich ebenfalls nach biologischen Mustern bewegt. Durch den Einsatz des Leap Motion Sensors kann eine biologische Bewegung des Handmodells gewährleistet werden. Ziel der Versuchsreihe A ist die Untersuchung der minimalistisch gestalteten Handmodelle. Die Hand- und Fingerbewegungen des Nutzers dienen über den Leap Motion Sensor als Eingabe und werden auf die Handmodelle übertragen. Die minimalistischen Darstellungen entsprechen zwei Stäbchenmodelle sowie einem Punktwolkenmodell. Es stellt sich die Frage, ob eine Punktwolke dank der biologischen Bewegungsmuster des Handmodells, parallel zur Nutzerhand, ausreichend Referenz zur Erkennung bietet. Bei der Untersuchung werden Daten zur kognitiven Beanspruchung und zur Zeigeperformanz erhoben. Die Zeigeperformanz wird mittels einem Fitts'schen Zeigerversuch ermittelt. Der Versuch wird, gemäß der Vorgaben durch den Prototyp, in einer stereoskopischen Desktopumgebung durchgeführt. Da durch in der stereoskopischen Desktopumgebung auftretende Wahrnehmungskonflikte negative Effekte auftreten können, ist der Fitts'sche Zeigerversuch so aufgebaut, dass die Zielobjekte der Zeigaufgabe auf drei verschiedene Tiefenebenen liegen. Die im Fitts'schen Zeigerversuch erhobenen Daten für die Bewegungszeit wurden pro Teilnehmer auf Ausreißer nach Tukey (1977) untersucht und die Daten entsprechend bereinigt. Jede Zeigebewegung wurde insgesamt drei Mal ausgeführt, aus den Wiederholungen wurden Mittelwerte gebildet und anschließend weiter ausgewertet.

4.2.2 Versuchsdesign

Der Hauptversuch war in drei Teile untergliedert. Im ersten Teil wurden ein Sehtests sowie allgemeine Vortests durchgeführt. Die stereoskopische Seekarte inklusive aller möglichen Objekte wurden für den Fitts'schen Zeigerversuch ausgeblendet, nur der Hintergrundgradient blieb sichtbar. Es waren dadurch, abgesehen vom virtuellen Handmodell, keine Tiefenhinweise im virtuellen Raum vorhanden. Mit dem Handmodell wurden die Zeigebewegungen durchgeführt, als Interaktionsmedium diente die Zeigefingerspitze des Handmodells, mit der auf Zielobjekte gezeigt werden sollte. Die wahrnehmbare räumliche Tiefe entstand durch das verwendete Handmodell sowie die Zielobjekte aus der Fitts'schen Zeigaufgabe. Dadurch war sichergestellt, dass die subjektive Größeneinschätzung des Handmodells im dreidimensionalen Raum nicht durch aufgabenfremde Tiefenhinweisen gestört wird. Es wurden insgesamt 15

Zielobjekte mit verschiedenen Größen definiert und auf insgesamt drei Tiefenebenen halbkreisförmig vom zentralen Startobjekt aus verteilt. Die Zielobjekte waren halbkreisförmig mit einer Winkelgröße Der Winkel $\theta = 45$ um dieses Startobjekt angeordnet, welches sich zentral immer an der gleichen Stelle befand. Dadurch ergaben sich für jede Tiefenebene eine Gesamtmenge von fünf Objekten. Die Grundlagen zur methodischen Vorgehensweise zur Bewertung der Zeigebewegungen werden in Kapitel 2.2.4 beschrieben. Die dort dargelegte Theorie zum Fitts'schen Gesetz und zur Bewertung von Eingabegeräten werden für die Umsetzung des empirischen Teils in Versuchsreihe A angewendet (DIN EN ISO 9241-420, 2011). Diese Grundlagen werden verwendet, um die Fitts'sche Zeigaufgabe in ein Software zu implementieren, die als Modul in die Software der stereoskopischen Lagedarstellung integriert wird. Diese Klassen ermöglichten in Kombination das Erstellen der Zielobjekte in beliebiger Positionierung. Die Zielobjekte wurden mit einer Kollisionsabfrage versehen, die auf der Konvexen Hülle der Zielobjekte pro Takt durchgeführt wurde. Der Takt der Software betrug 60 Ausführungen pro Sekunde. Die Sichtbarkeit der Zielobjekte wurde zufällig bestimmt. Eine Übersicht über das Versuchsdesign aus Versuchsreihe A ist in Abbildung 4.8 dargestellt. Die Zeigaufgabe wurden jeweils drei Mal pro Objekt durchgeführt. Die Bewegungszeit wurde aufgezeichnet, für jeden Schwierigkeitsgrad kumuliert, dann pro Tiefenebene zusammengefasst und mithilfe einer ANOVA (Signifikanzlevel $\alpha=0.05$) analysiert.

Abbildung 4.4 zeigt den schematischen Aufbau der Zeigebewegungen auf die Zielobjekte, die in verschiedenen Größen in der virtuellen Umgebung halbkreisförmig um das Startobjekt angeordnet waren. Das Startobjekt befand sich direkt in der Realposition direkt über der Leap Motion und lag auf der mittleren Tiefenebene. Die hintere sowie vordere Tiefenebene lagen jeweils etwa 100 mm hinter bzw. vor der mittleren Ebene. Abbildung 4.9 zeigt die Verteilung der virtuellen Objekte im realen Raum.

4.2.3 Unabhängige Variablen

Verglichen wurden die drei unterschiedliche Darstellungsvarianten der minimalistisch gestalteten virtuellen Hand, welche über den eingesetzten Leap Motion Sensor vom Nutzer als Eingabe gesteuert wurde und als drei unabhängige Variablen definiert. Der

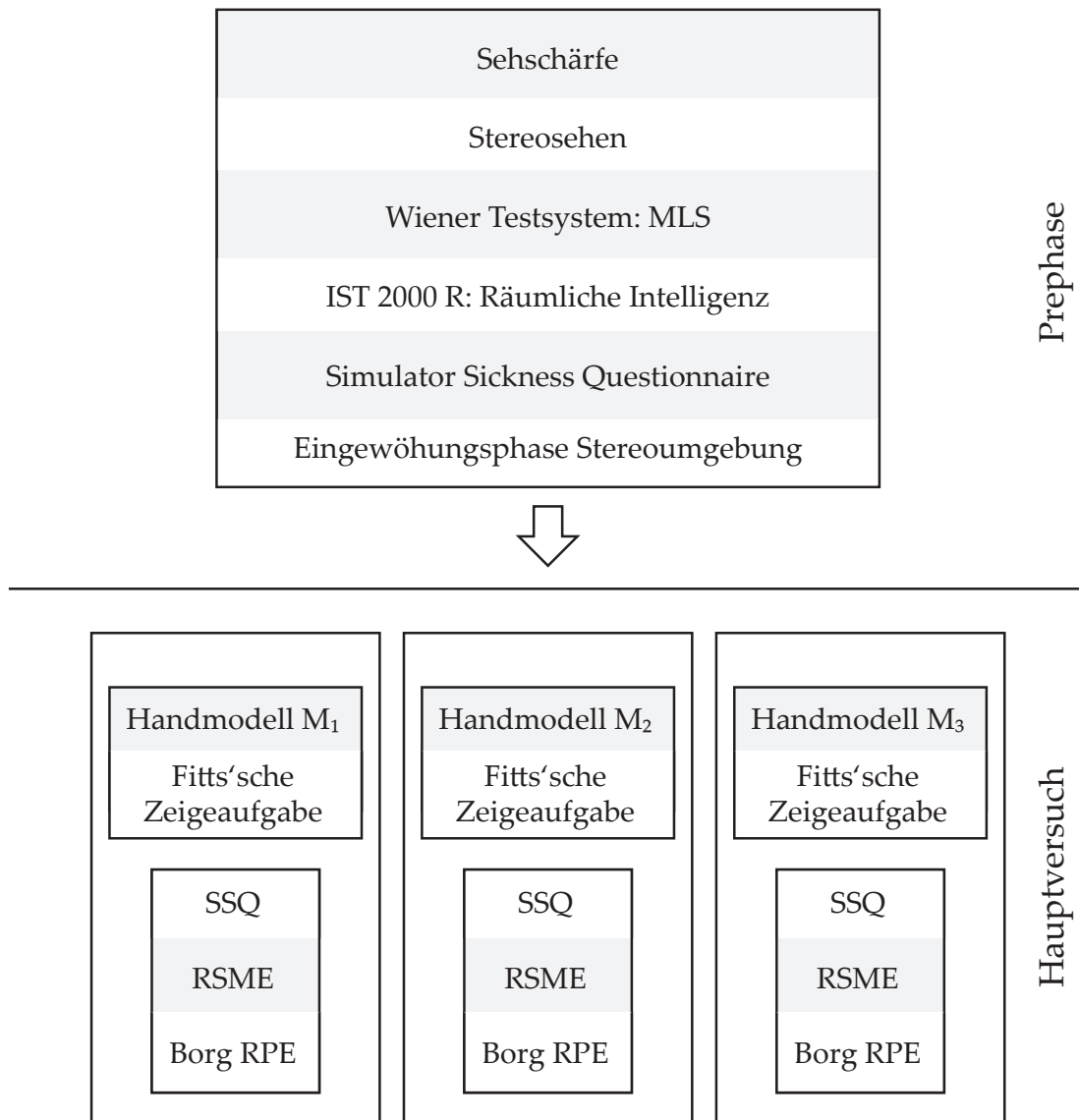


Abbildung 4.8: Schematischer Ablauf Versuchsreihe A

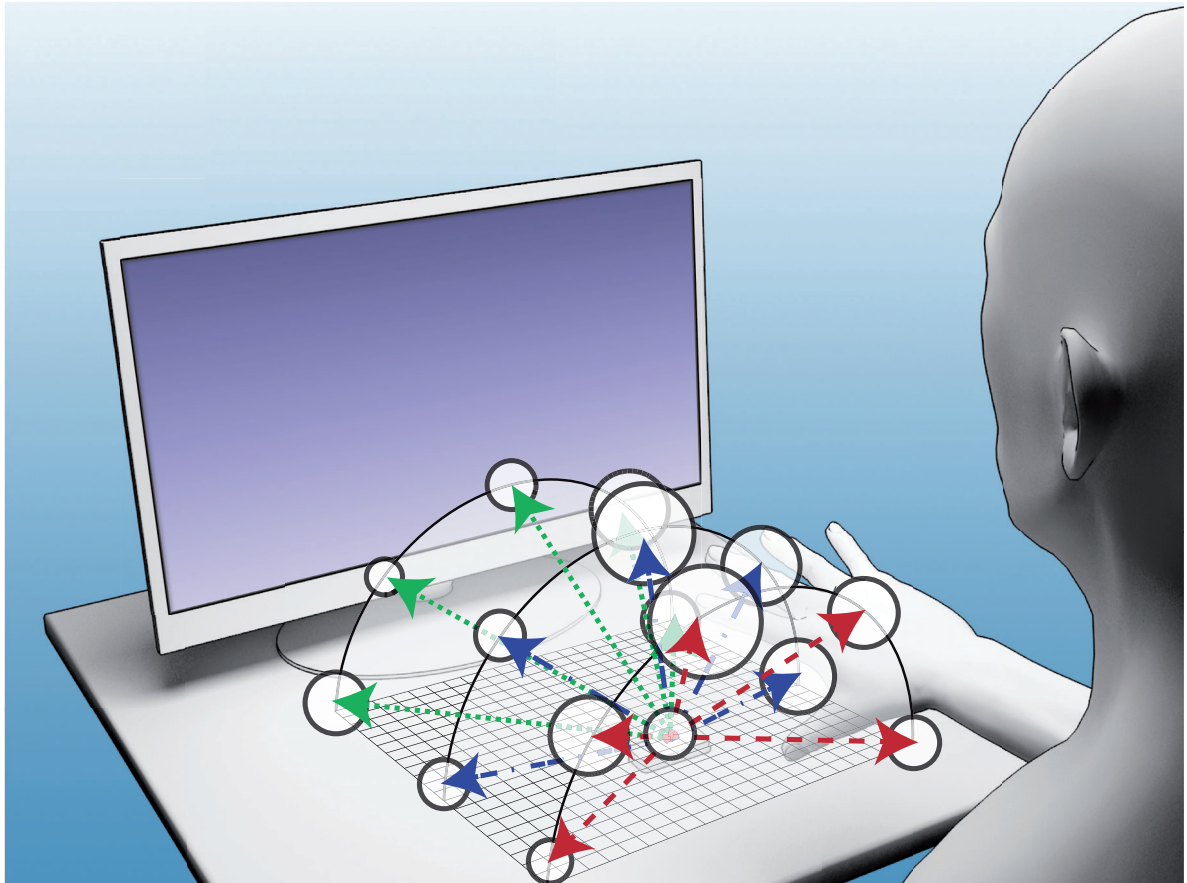


Abbildung 4.9: Verteilung der Zielobjekte auf die drei Tiefenebenen, die vom Nutzer stereoskopisch wahrgenommen werden

Spitze des Zeigefingers reagierte als einziger Teil des Handmodells auf Kollisionen mit Start- sowie Zielobjekten in der virtuellen Umgebung.

4.2.4 Abhängige Variablen

Als abhängige Variablen wurde eine Zeitmessung zwischen Berührung des Start- und des Zielobjektes erfasst. Die Position und die Größe der Zielobjekte war bekannt. Weiterhin wurden aus den Vortests der Score des Würfeltests sowie drei der Fleishman-Faktoren „Unruhe“, „Präzision“ und „Geschwindigkeit“ aus der motorischen Leistungsserie erfasst. Während des Hauptversuches wurden, als Liste zusammengefasst, die folgenden abhängigen Variablen erfasst:

- Kumulierte Bewegungszeit für Zeigefinger von Start- zu Zielobjekt.
- Kumulierte Bewegungszeit pro Tiefenebene
- RSME-Skala zur subjektiven Bewertung der kognitiven Beanspruchung bei Benutzung der Handmodelle
- Index of Difficulty nach Paul Fitts für jedes Zielobjekt
- Über den „Simulator Sickness Questionnaire“ werden Wohlbefinden und allgemeine Symptome der Simulatorkrankheit des Versuchsteilnehmers nach jeder Benutzung des Handmodells erfasst
- Fleishman-Faktoren aus der Motorischen Leistungsserie
- Ergebnisse des Würfeltests aus der Vortestreihe

4.2.5 Versuchsdurchführung

Der Versuchsablauf war in drei Phasen unterteilt. Nach einer kurzen Begrüßung durch den Versuchsleiter begannen die Teilnehmer begannen den Versuch in der Pre-Test-Phase, in der die Abfrage der demographischen Daten und ihrer Vorerfahrung über gestische Eingabesysteme und Eingabegeräte in virtuellen Umgebungen erfolgte. Anschließend wurde der Visus der Teilnehmer mit dem „Rodatest 302“ der Firma Vistec gemessen. Es folgte die Durchführung der Tests zur räumlichen Vorstellung wobei der „Dreidimensionale Würfeltest“ von Gittler (Gittler, 1990) aus

dem IST 2000 R verwendet wurde. Danach wurden die Teilnehmer zu ihren feinmotorischen Fähigkeiten der rechten Hand in Form des SCHUHFRIED Wiener Test Systems getestet. Die erhobenen Leistungsdaten zu den motorischen Fähigkeiten der Versuchsteilnehmer wurden nach Fleishman (Fleishman & Ellison, 1962) in die Faktoren „Unruhe“, „Präzision“ und „Geschwindigkeit“ unterteilt und die jeweiligen Faktoren berechnet. Die Vorbereitung auf den Hauptteil wurde mit dem Ausfüllen eines „Simulator Sickness Questionnaires“ (SSQ) abgeschlossen, um das Wohlbefinden der Teilnehmer vor dem Hauptteil des Versuchs zu erfassen, zu diesem Zeitpunkt trugen die Versuchsteilnehmer noch keine passive 3D-Brille.

Nun folgte ein Platzwechsel an den Einzelarbeitsplatz mit dem stereoskopischen Display sowie die Übergabe der passiv-stereoskopischen Brille an den Teilnehmer. Die Sitzposition des Teilnehmers wurde so angepasst, dass der Sehabstand zwischen Brillensteg und Stereodisplay zu Beginn 75 Zentimeter betrug. Auf eine Kopfstütze zur Einhaltung der Distanz wurde bewusst verzichtet, da der Freiraum zwischen Körper und Display zur „Mid Air“-Interaktion mit der stereoskopischen Desktopumgebung freigehalten werden musste. Stattdessen wurde der Teilnehmer aufgefordert, den Sehabstand während des Versuchsablaufs möglichst wenig in der Tiefe zu verändern. Der Versuchshauptteil begann mit einer zweiminütigen Eingewöhnungsphase, in der die stereoskopische Desktopumgebung vom Teilnehmer exploriert werden konnte. Dazu wurde zufällig eines der drei Handmodelle ausgewählt, um dem Teilnehmer die Bewegungsabläufe der eigenen Hand im virtuellen System vertraut zu machen. Zielobjekte waren zur Durchführung der Eingewöhnungsphase ausgeblendet, so dass die Teilnehmer lediglich das Handmodell vor dem Hintergrundgradienten sahen und verwenden konnten. Anschließend wurde der Hauptversuch gestartet, in dem für jedes der drei Handmodelle die Fitts'sche Zeigeaufgabe, wie in Kapitel 2.2.4 durchgeführt wurde. Zwischen den einzelnen Sets der Zeigeaufgabe wurden jeweils der SSQ und der Borg RPE (Borg et al., 2001) ausgefüllt. Für jedes Set an Zeigebewegungen mussten 15 Ziele getroffen werden, die in zufälliger Reihenfolge zusammen mit dem Startobjekt in der stereoskopischen Desktopumgebung auftauchten.

4.2.6 Versuchshauptaufgabe

In der Hauptaufgabe des Versuches führten Teilnehmer Zeigebewegungen mit dem dargestellten Handmodell durch, welche nach der Shannon-Formulierung der von Paul Fitts definierten Zeigeaufgabe ausgewertet wurde. Für jedes Handmodell wurden insgesamt drei wiederholte Zeigebewegungen auf die jeweils gleichen Ziele durchgeführt, was insgesamt 45 Zeigebewegungen pro Handmodell und Block entsprach und einer Gesamtsumme von 135 Zeigebewegungen pro Versuchsteilnehmer. Die Handmodelle wurden für die Versuchsdurchführung in permutierter Reihenfolge verwendet. Zeiterfassungen fanden jeweils zwischen den Berührungen der einzelnen Zielobjekte statt, wobei ein Objekt bei sofortiger Kollision aktiv wurde und die Zeitmessung begann. Durch den visuellen Reiz des Farbwechsels von grün zu grau beim Startobjekt und von grau zu grün beim Zielobjekt wurde dem Nutzer signalisiert, welches Objekt als nächstes getroffen werden musste. Die Auswahl der Zielobjekte fand nach den Vorgaben von Stuerzlinger und Teather (2014) statt, die in Kapitel 2.7.2 näher beschrieben sind. Da für den Versuch kugelförmige Zielobjekte verwendet wurden und damit eine eindimensionale Zielgröße definiert war, wird die Original-Formulierung nach Fitts für die Bestimmung der Zielgrößen verwendet, wie in Kapitel 2.2.4 beschrieben. Die Zielgrößen sind in Tabelle 4.1 dargestellt sowie die Platzierung auf der jeweiligen Tiefenebene. Die jeweiligen Nummerierungen eins, zwei und drei stehen für die Tiefenebenen Vorne, Mitte und hinten. Der Versuchsaufbau war so gestaltet, dass sich die reale Hand des Nutzers zwar im peripheren Sichtfeld befand, jedoch bei Bearbeitung der Zeigeaufgabe zu keiner Zeit in das stereoskopische Sichtvolumen eingedrungen ist.

4.2.7 Stichprobe

Die Stichprobengröße in Versuchsreihe A betrug zunächst 14 Teilnehmer, zehn Teilnehmer waren männlich und vier weiblich. Nachdem ein Teilnehmer aufgrund eines leichten Strabismus, welcher in eine stark erhöhte Fehlerrate resultierte, der Stichprobe entnommen werden musste, wurde die Datenauswertung mit 13 Versuchsteilnehmern durchgeführt. Das Alter der Teilnehmer lag zwischen 22 und 41 Jahren ($M = 27,23$; $SD=5,83$) als nicht bezahlte, freiwillige Teilnehmer, 46,2 % der Teilnehmer besaßen mindestens eine Hochschulzugangsberechtigung, 53,8 % der Teilnehmer einen Hochschulabschluss. Die Auswahl der Stichprobe geschah zufällig

Tabelle 4.1: Zielgrößen der 15 kugelförmigen Ziele und nach Fitts berechneten Index of Difficulty (ID) in bits. Absolute Darstellungsgröße auf dem Versuchsmontitor in Millimetern sowie relativer Größe sowie Positionierung auf vorderer (1), mittlerer (2) sowie hinterer (3) Tiefenebene sind ebenfalls angegeben.

Ziel	ID (bits)	Größe W (mm)	Größe W (Bogenminuten)	Tiefenebene
1	3	20,5	94,2	3
2	3,2	17,7	81,3	2
3	3,3	15,3	69,9	1
4	3,3	15,9	72,8	2
5	3,4	14,3	65,6	3
6	3,4	13,4	61,4	3
7	3,4	12,8	58,5	1
8	3,4	13,7	62,8	1
9	3,6	10,6	48,5	3
10	3,6	10,3	47,1	1
11	3,6	10,3	47,1	2
12	3,7	9	41,4	3
13	3,8	8,4	38,5	2
14	4	6,8	31,4	1
15	4,1	5,9	27,1	2

und bestand aus dem weiteren Umfeld Mitarbeitern und Studierenden der RWTH Aachen. Die Sehschärfe der Versuchspersonen betrug mindestens 80 Prozent. Alle Versuchspersonen wurden auf Farbsehen sowie räumliches Sehen untersucht.

Bei Erhebung der demographischen wurden die Teilnehmer befragt, ob sie bereits Erfahrungen gestischen Eingabesystemen in drei Dimensionen haben und entsprechende Geräte nutzen. Neun der Teilnehmer gaben an, keine gestischen Eingabegeräte zu nutzen oder genutzt zu haben. Vier Teilnehmer bejahten diese Frage, zwei der Teilnehmer machten keine näheren Angaben und zwei waren mit der Gesteneingabe über ein Myoarmband vertraut, womit theoretisch die Erkennung der relativen Positionierung der Hand im dreidimensionalen Raum möglich ist. Ein Versuchsteilnehmer nutzt das Myoarmband regelmäßig zur Steuerung von Musiksoftware und Komposition von Musik. Myoarmbänder sind mit Inertialsensoren ausgestattet, die auch zur Erkennung von Handgesten verwendet werden können (vgl. Kapitel 2.6). Sechs der Dreizehn Teilnehmer gaben an, mit Darstellungen in der virtuellen Realität bereits vertraut zu sein.

4.2.8 Hypothesen

In Versuchsreihe A soll das Handmodell gefunden werden, welches die Rahmenbedingungen erfüllt, die aus den vorangegangenen Expertengesprächen abgeleitet werden konnten. Das dem zugrundeliegende Konzept ist in Kapitel 3.4.3 beschrieben. Das Konzept sieht die Gestaltung von minimalistischen Handmodellen vor, woraufhin sich für zwei Modelle mit verschiedenen Stäbchenstärken entschieden wurde, sowie ein Handmodell ohne Stäbchen, in dem nur die Gelenke der Finger sowie der Handwurzelknochen als Punkte dargestellt werden. Es soll für die verschiedenen Handmodelle bestimmt werden, bis zu welcher visuell reduzierten Stufe das Handmodell eine flüssige Arbeitsweise in der virtuellen Umgebung noch möglich ist. Die flüssige Arbeitsweise ist in der Fitts'schen Zeigeaufgabe dadurch definiert, dass auch Ziele in kleiner Größe noch schnell mit dem Zeigefinger des Handmodells getroffen werden konnten, also ein Effekt für die gemessene Bewegungszeit zwischen Start- und Zielobjekt der Fitts'schen Zeigeaufgabe auftritt.

H_1 : Die Messwerte für Bewegungszeiten des Faktors Handmodelle unterschei-

den sich nicht.

H₂: Die Bewegungszeiten für Zeigebewegungen mit dem Handmodell M₃ unterscheiden sich nicht signifikant von den Bewegungszeiten von Handmodell M₂.

H₃: Zeigebewegungen mit dem Handmodell M₁ keine signifikant geringeren Bewegungszeiten gemessen werden, als mit Handmodell M₂.

H₄: Die gemessene Bewegungszeit mit steigendem „Index of Difficulty“ der Zielobjekte für den Faktor Handmodelle nimmt nicht zu.

H₅: Bei Versuchsteilnehmern, die bereits Erfahrungen mit Darstellungen in der virtuellen oder erweiterten Realität haben, werden keine kürzere Bewegungszeiten für alle Handmodelle gemessen.

Die Zielobjekte waren in drei Tiefenebenen angeordnet, so dass fünf Ziele in der vorderen Ebene, fünf Ziele auf der mittleren Ebene, und fünf Ziele auf der hinteren Ebene wahrgenommen wurden. Da die stereoskopische Wahrnehmung durch die Akkommodation auf die Ebene der Anzeigefläche gestört sein kann, wird angenommen, dass die Bewegungszeiten auch einen Effekt hinsichtlich der verschiedenen Tiefenebenen aufweisen. Zielobjekte unterschiedlicher Größen liegen auf allen Tiefenebenen, dadurch war der Tiefenhinweis der Querdissparation notwendig, um das Ziel in der richtigen Tiefe mit angemessener Geschwindigkeit zu treffen.

H₆: Zeigebewegungen für alle Handmodelle haben keine unterschiedlichen Bewegungszeiten für jede einzelne Tiefenebene.

H₇: Zeigebewegungen mit Handmodell M₃ weisen keine abweichenden Bewegungszeiten für die hintere Tiefenebene auf.

H₈: Große Ziele in der hinteren „Tiefenebene“ sind nicht leichter zu treffen als große Ziele in der vorderen Tiefenebene.

Die subjektive kognitive Beanspruchung wurde mit der RSME-Skala erfasst, die nach Benutzung eines jeden der drei Handmodelle vom Probanden angegeben wurde.

Da die Erkennung des Handmodells je nach Detaillierungsgrad schwieriger war, ist hier von einem Effekt für den Faktor Handmodelle auszugehen, da für die Benutzung eines schlechter zu erkennenden Handmodells eine höhere kognitive Beanspruchung vorliegen kann.

H₉: Die subjektiv empfundene mentale Beanspruchung bei der Benutzung von Handmodell M₃ ist nicht höher, als bei der Benutzung von Handmodell M₁ und Handmodell M₂.

H₁₀: Die subjektiv empfundene mentale Beanspruchung korreliert nicht mit den Bewegungszeiten pro Handmodell.

Durch die „Mid Air“-Bewegungen zur Steuerung des Handmodells in der stereoskopischen Desktopumgebung ist eine erhöhte muskuläre Beanspruchung des Arm-Schulter-Apparates wahrscheinlich. Diese Beanspruchung wurde subjektiv über die Borg-RPE-Skala erfasst und nach Benutzung eines jeden Handmodells, also nach 45 Zeigebewegungen vom Versuchsteilnehmer bewertet.

H₁₁: Die subjektiv empfundene körperliche Anstrengung von der ersten Ausführungsbewegung zur letzten Ausführungsbewegung zeigt keinen Anstieg.

Neben der Validierung der motorischen Fähigkeiten der Versuchsteilnehmer wurden die Ergebnisse der Fleishman-Faktoren „Unruhe“, „Präzision“ und „Geschwindigkeit“ verwendet, um eine Korrelationsanalyse der Performanz der durchgeführten Zeigebewegungen durchzuführen. Hier galt es vor allem herauszufinden, ob die motorischen Fähigkeiten eines Versuchsteilnehmers Einfluss auf die Bewegungszeit und damit auf die Zeigep Performanz haben.

H₁₂: Zeigebewegungen für Handmodell M₃ nicht schneller von Versuchsteilnehmern ausgeführt werden können, wenn ein ausgeprägteres, räumliches Vorstellungsvermögen vorliegt.

Durch das eingesetzte stereoskopische Anzeigesystem war die Möglichkeit eines Reizwiderspruchs gegeben, da bestimmte Tiefenhinweise mit der vorhandenen Technologie nicht abgebildet werden können. Bei Betrachtung der Versuchsumgebung akkommodiert die Linse des Auges des Versuchsteilnehmers auf die Anzeigeebene

und erzeugt einen Reizwiderspruch zum Vergenzwinkel auf ein Objekt, welches weiter vorne oder hinter der wahrgenommenen Position liegt. Dies begünstigt kognitive Ermüdungserscheinungen oder Ermüdungen des Ziliarmuskels. Die Möglichkeit des Auftretens der Simulatorkrankheit ist erhöht.

H₁₃: Der Score des „Simulator Sickness Questionnaire“ für Handmodell M₃ weist keine höheren Messwerte auf, als für Handmodell M₁ und M₂.

H₁₄: Bei der Benutzung von Handmodell M₃ treten keine stärkeren Ermüdungserscheinungen der Augen auf, als mit Handmodell M₁ und Handmodell M₂.

4.2.9 Ergebnisse des Hauptversuches A

Die verbleibenden 13 Personen der Stichprobe führten die Zeigeaufgabe jeweils bis zum Ende durch. Ein Shapiro-Wilk-Test auf die gemittelten Bewegungsdaten der Fitts'schen Zeigeaufgabe auf alle Werte ergab, dass die Daten eine Normalverteilung aufweisen. Für die Ermittlung der Ergebnisse konnten auf die Bewegungsdaten somit Varianzanalysen durchgeführt werden. Aus den drei Wiederholungen, die jeder Versuchsteilnehmer ausführte, wurden Mittelwerte gebildet, so dass für jeden Teilnehmer insgesamt 45 Werte aus der Bewegungsdatenerfassung vorlagen. Auf die zuvor aufgestellten Hypothesen wird im Folgenden detailliert eingegangen.

Allgemeine Bewegungszeit Um die Nullhypothese H₁ auszuwerten, werden die Daten aus der erfassten Zeiten zwischen Start- und Zielobjekt aus dem Fitts'schen Zeigerversuch untersucht. Die deskriptive Analyse der Bewegungszeiten für alle drei Handmodelle ist in Abbildung 4.10 dargestellt. Es wird deutlich, dass die Daten für Handmodell M₁ und Handmodell M₂ erhöhte Varianzen aufweisen, die bei der Verwendung von Handmodell M₃ nicht aufgetreten sind. Die Bewegungszeit in Millisekunden für das Handmodell M₂ mit dünnen Stäbchen war am niedrigsten (M = 1905,98, SD = 294,14), es folgt Handmodell M₁ (M = 2.033,85, SD = 293,12) mit kräftigen Stäbchen, Handmodell M₃ weist die höchsten Bewegungszeiten auf (M = 2.125,38, SD = 132,93). Ein Mauchly-Test auf Sphärizität ergab keinen Hinweis auf Verletzung. Um einen allgemeinen Effekt für den Faktor der unterschiedlichen

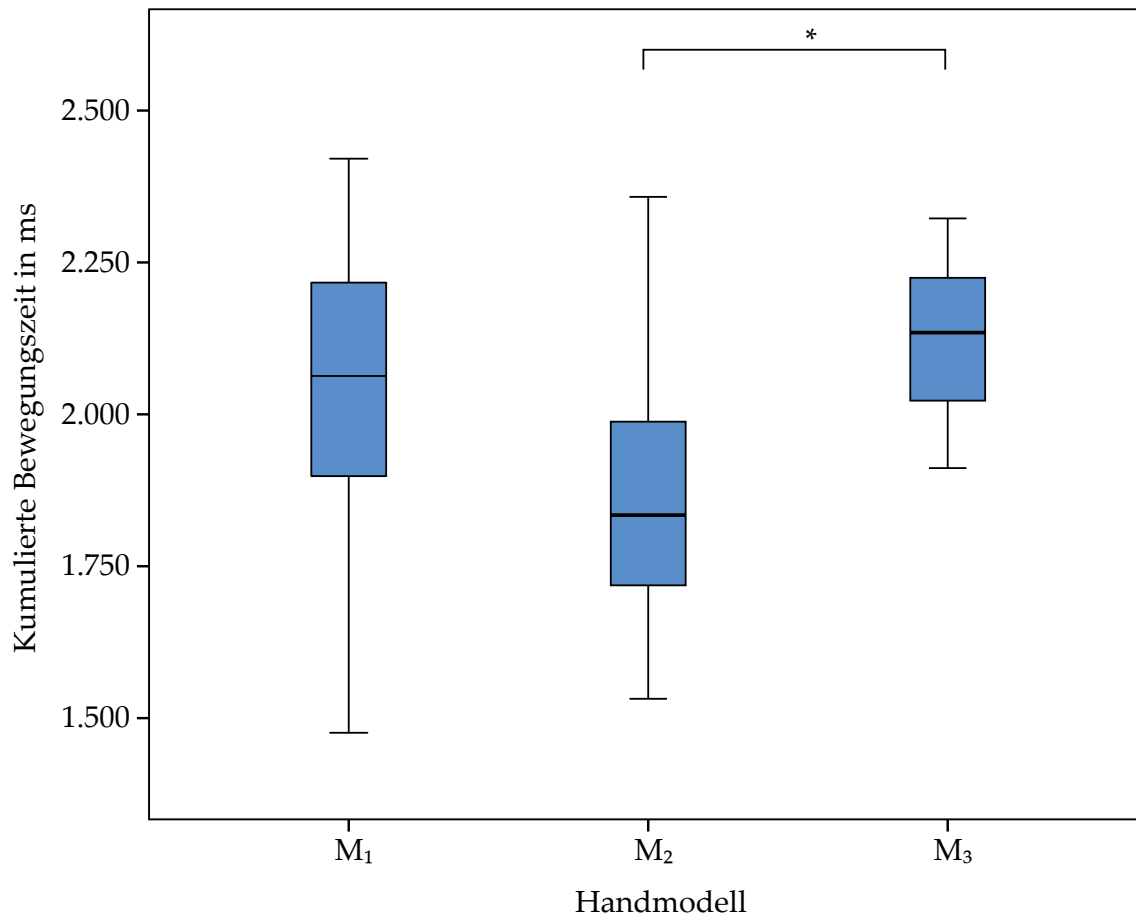


Abbildung 4.10: Ergebnisse der abhängigen Variable „Bewegungszeit“ zum Faktor „Handmodell“ mit den Visualisierungen M₁, M₂ und M₃.

Visualisierungsgrade der Handmodelle zu bestimmen, wurden Mittelwerte für alle Tiefenebenen der Bewegungszeiten aus der Zeigeaufgabe gebildet und mittels einer Varianzanalyse mit Messwiederholung analysiert. Die Analyse zeigt einen signifikanten Unterschied in der Bewegungszeit zwischen den verschiedenen Visualisierungen der Handmodelle, $F_{(2; 24)} = 4,447$, $p=0,023$. Die Effektstärke ist mit $\eta^2 = 0,27$ hoch. Nullhypothese H₁ wird damit abgelehnt. Ein Post-hoc Test über einen paarweisen Vergleich mittels T-Tests mit Bonferroni-Korrektur zeigte einen signifikanten Unterschied ($p = 0,05$) in den Bewegungszeiten zwischen Handmodell M₃ gegenüber M₂ (-219,4; 95%-CI[-439,27; 0,48]). Die Annahme aus Nullhypothese H₂, dass sich die Bewegungszeiten für Zeigebewegungen mit dem Handmodell M₃ nicht signifikant von den Bewegungszeiten mit dem Handmodell M₂ unterscheiden wird abgelehnt.

Nullhypothese H₃ kann angenommen werden, da sich bei den Bewegungszei-

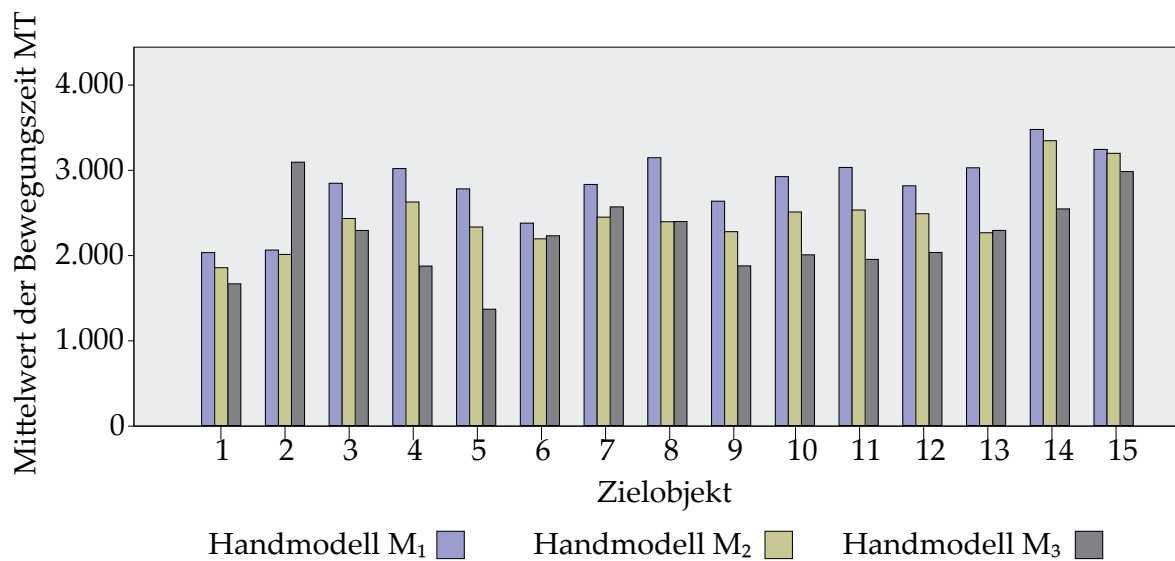


Abbildung 4.11: Deskriptive Mittelwerte von Handmodell M₁, M₂ und M₃.

ten mit Handmodell M₁ im Paarvergleich mit Handmodell M₂ kein signifikanter Unterschied ($p = 0,171$) in den Bewegungszeiten der Handmodelle zeigte (127,87; 95%-CI[-40,98; 296,73]). In der deskriptiven Analyse zeigte Handmodell M₁ jedoch längere Bewegungszeiten als Handmodell M₂.

Die Zunahme der Bewegungszeit über den steigenden Index of Difficulty ist deskriptiv in Abbildung 4.11 veranschaulicht. Eine Zuordnung der Werte für den Index of Difficulty sowie der Objektpositionen und Objektgröße kann über Tabelle 4.1 vorgenommen werden.

Abbildung 4.12 zeigt den linearen Zusammenhang zwischen Index of Difficulty (ID) und Bewegungszeit. Die Bestimmtheitsmaße für die Handmodelle M₁ und M₂ sind mit $R^2 = 0,65$ und $R^2 = 0,67$ ähnlich, das Bestimmtheitsmaß für Handmodell M₃ weist mit dem Wert $R^2 = 0,19$ einen schwachen linearen Zusammenhang auf. Die über die Datenpunkte bestimmten Trendlinien sind für alle drei Handmodelle linear aufsteigend. Damit erfüllt sich durch den stärkeren linearen Zusammenhang für Handmodell M₁ und Handmodell M₂ die Erwartung, dass die Bewegungszeit mit steigendem Index of Difficulty der Zielobjekte zunimmt. Da der lineare Zusammenhang für Handmodell M₃ schwächer ist, kann Nullhypothese H₄ für Handmodell M₁ und Handmodell M₂ abgelehnt werden.

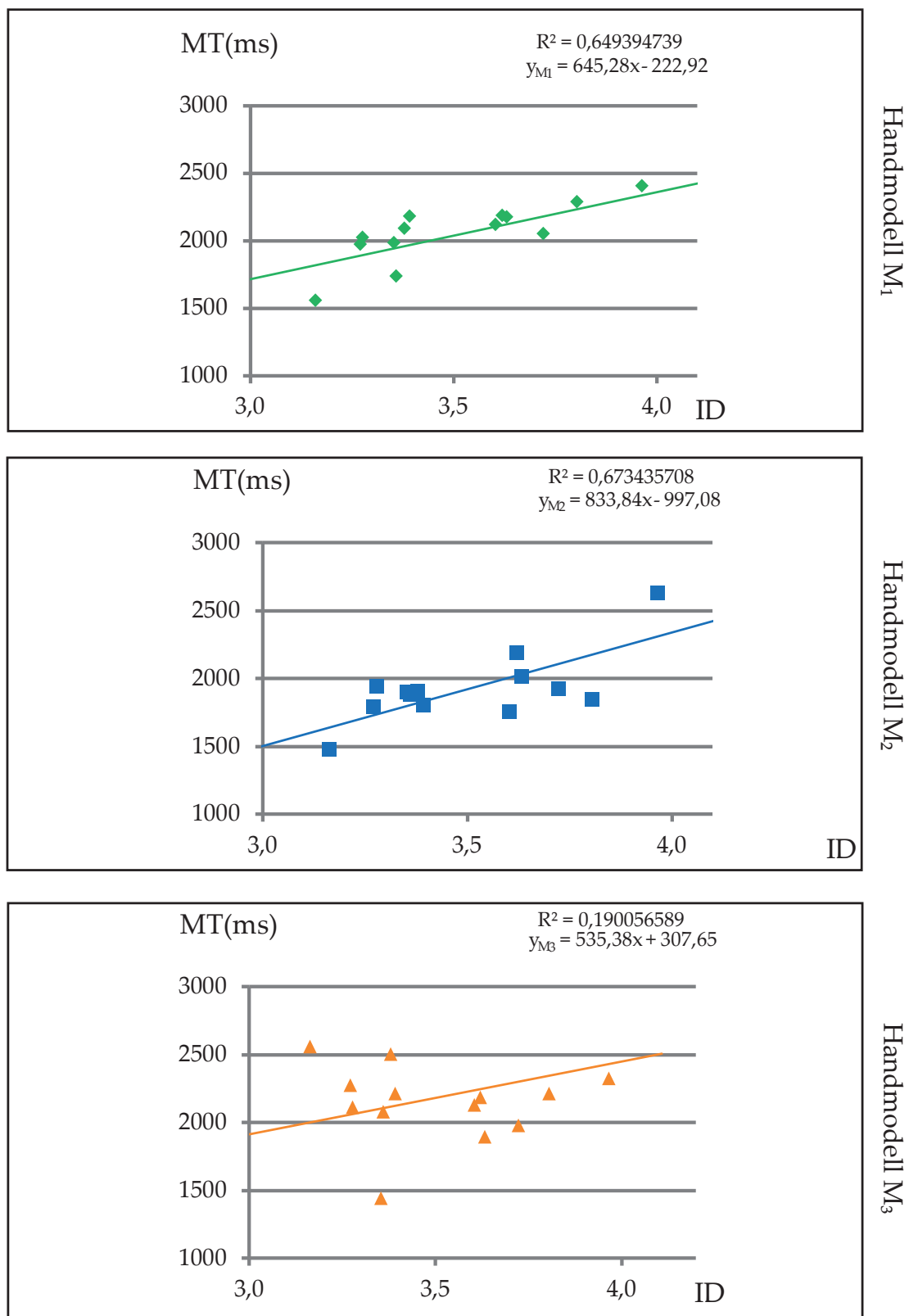


Abbildung 4.12: Linearer Zusammenhang zwischen Index of Difficulty und Bewegungszeit für Handmodelle M₁, 2, 3.

In Abbildung 4.11 werden Unterschiede für die jeweiligen Darstellungen der Handmodelle deutlich, für manche Zielobjekte gibt es Abweichungen in den Bewegungszeiten für Handmodell M₃. Um zu überprüfen, ob durch Vorerfahrungen mit anderen Systemen aus der Virtuellen oder Erweiterten Realität die Ausführung der Fitts'schen Zeigeaufgabe begünstigt, wurde der Faktor „Vorerfahrung mit VR/AR-Systemen“ aus dem demographischen Fragebogen in Zusammenhang mit den gemittelten Bewegungszeiten aus der Fitts'schen Zeigeaufgabe untersucht. Dazu wurde eine mixed ANOVA durchgeführt, in der der nominal skalierte Faktor „Vorerfahrung mit VR/AR-Systemen“ als Zwischensubjektfaktor angegeben wurde. Um die Daten auf Normalverteilung zu überprüfen, wurde ein Shapiro-Wilk-Test durchgeführt, in dem keine Verletzung auf Normalverteilung festgestellt wurde ($p > 0,05$). Über einen Boxplot wurden zwei leichte Ausreißer ermittelt, die in der Stichprobe verblieben sind. Ein Mauchly-Test ergab keine Verletzung auf Sphärizität. In einem Levene-Test auf Gleichheit der Fehlervarianzen war ebenfalls kein Ergebnis signifikant, die Homogenität der Fehlervarianzen aller Variablen war damit erfüllt ($p > 0,05$). Die Homogenität der Kovarianzenmatrizen war gemäß dem Box-Test ebenso gegeben ($p = 0,533$). Es gab keine statistisch signifikante Beeinflussung durch „Vorerfahrung mit VR/AR Systemen“ zu den Bewegungszeiten in der Fitts'schen Zeigeaufgabe $F(2, 8367,85) = 0,220$; $p = 0,804$; partielles $\eta^2 = 0,02$. Bei Versuchsteilnehmern, die bereits Erfahrungen mit Darstellungen in der virtuellen oder erweiterten Realität haben, werden damit keine kürzere Bewegungszeiten für alle Handmodelle gemessen. Nullhypothese H₅ wird angenommen.

Bewegungszeit für Tiefenebenen Abbildung 4.13, 4.14 und 4.15 stellen den linearen Zusammenhang zwischen den einzelnen Handmodellen pro Tiefenebene für den Index of Difficulty dar. Betrachtet man die Ergebnisse des linearen Zusammenhanges aus Abbildung 4.13 wird deutlich, dass die Werte nicht für jedes Handmodell steigend sind, sondern die Bewegungszeiten für Handmodell M₃ beispielsweise fallen. In der Einzelanalyse der Daten für die Bewegungszeit pro Handmodell und Tiefenebene befanden sich keine Ausreißer. Alle Daten wurden mit einem Shapiro-Wilk-Test auf Normalverteilung überprüft. Nur der Datensatz mit den Bewegungsdaten für Handmodell M₂ in der vorderen Tiefenebene verletzte das Kriterium der Normalverteilung. Alle weiteren Datensätze verletzten das Kriterium nicht. Da die Varianzanalyse ge-

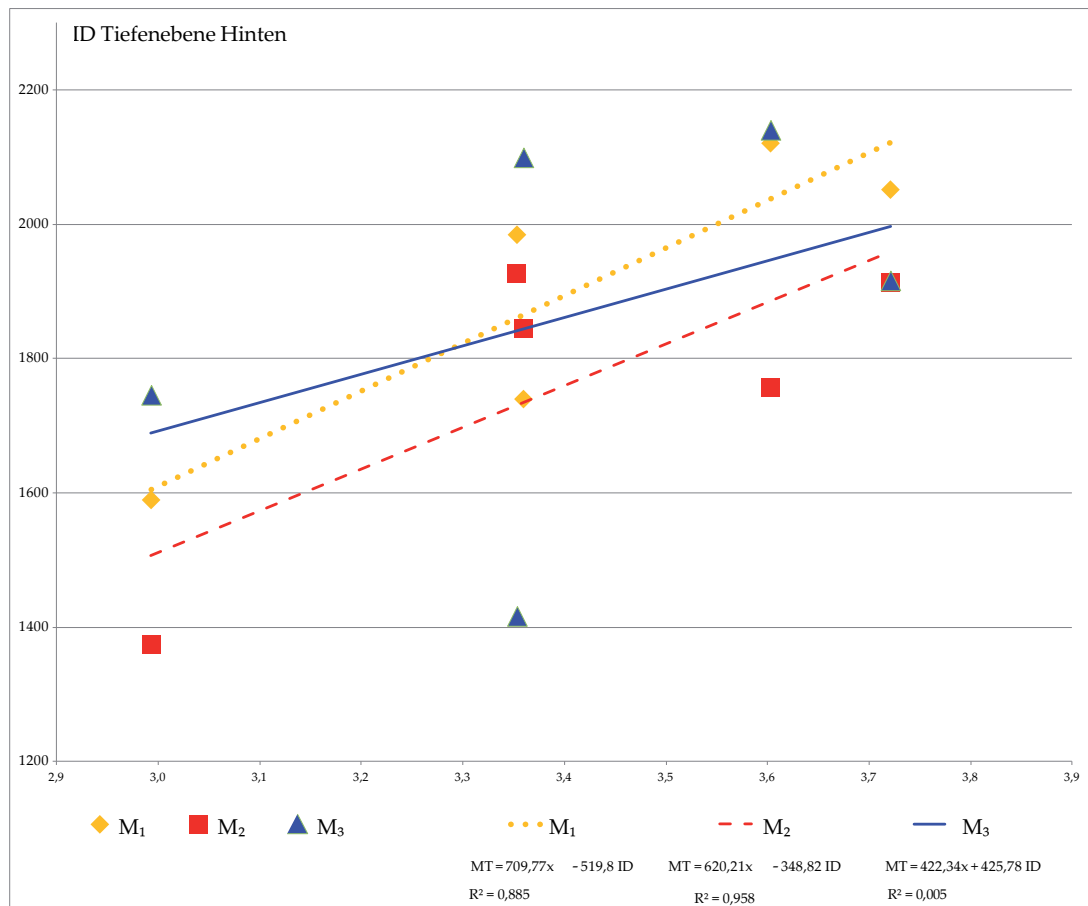


Abbildung 4.13: Linearer Zusammenhang der Bewegungszeiten für Handmodelle M₁, M₂ und M₃ der hinteren Tiefenebene

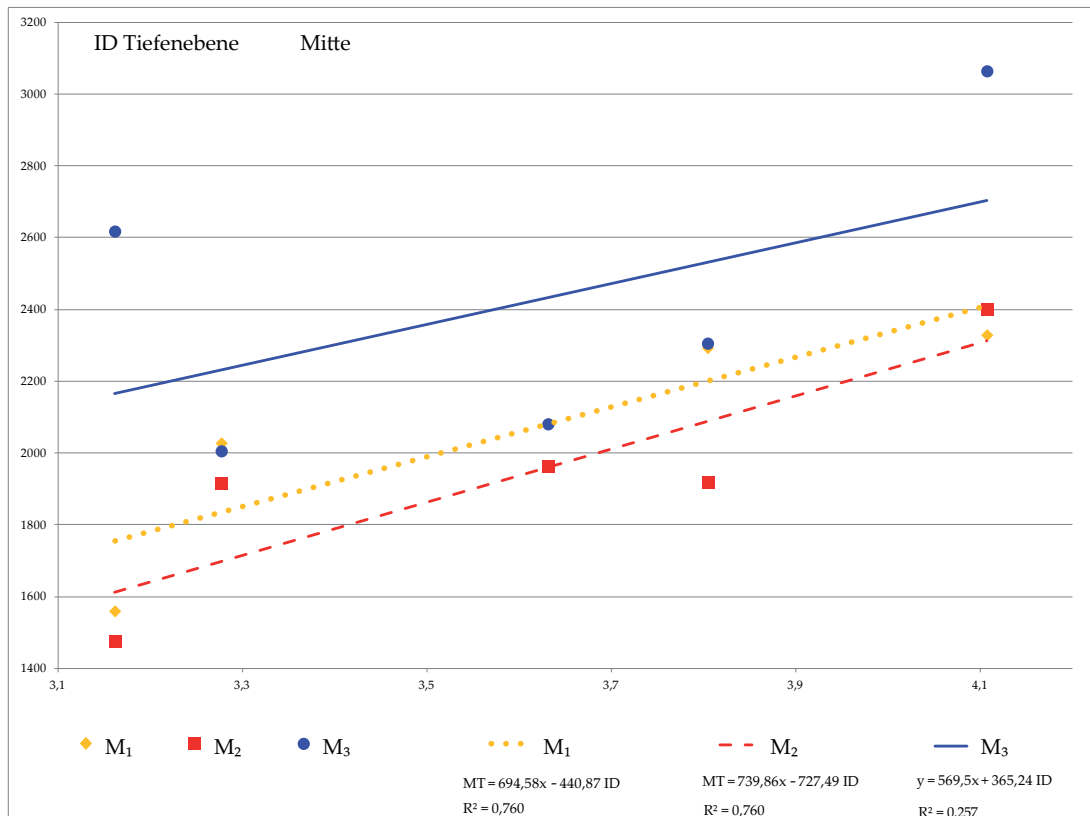


Abbildung 4.14: Linearer Zusammenhang der Bewegungszeiten für Handmodelle M₁, M₂ und M₃ mittleren Tiefenebene

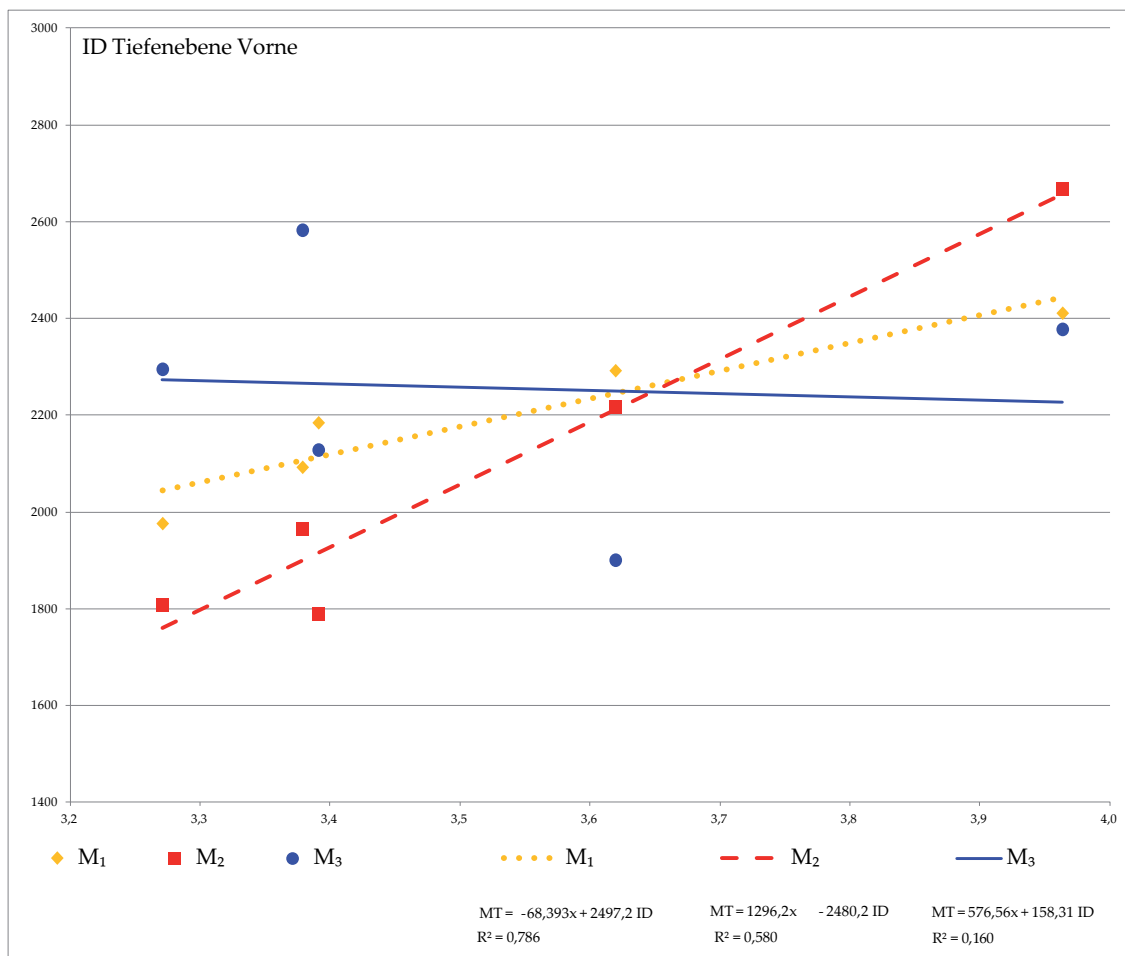


Abbildung 4.15: Linearer Zusammenhang der Bewegungszeiten für Handmodelle M_1 , M_2 und M_3 vorderen Tiefenebene

genüber dem Kriterium der Normalverteilung als robust gilt (Vasey & Thayer, 1987) und keine Ausreißer gefunden wurden, wird dennoch eine Analyse der Daten für die Bewegungszeiten über die drei verschiedenen Tiefenebenen mit einer ANOVA durchgeführt. Zunächst wird eine Betrachtung der deskriptiven Werte vorgenommen, die in Tabelle 4.2 aufgelistet sind. Die Bewegungszeiten sind im Mittel für die hintere Tiefenebene geringer für jedes der drei Handmodelle, für die mittlere Tiefenebene und vordere Tiefenebene in der angegebenen Reihenfolge jeweils höher. In einem Mauchly-Test wurde keine Verletzung der Sphärizität in den Faktoren Tiefenebene und Handmodell festgestellt. In der Berechnung einer 3x3 ANOVA trat für die durchschnittlichen Bewegungszeiten für den Faktor Handmodelle ein signifikanter Effekt auf mit $F(2; 24) 65,951$; $p < 0,01$, $\eta^2 = 0,846$. Auch der Faktor Tiefenebene war signifikant mit $F(2; 24) 4,355$; $p < 0,04$; $\eta^2 = 0,266$. Der Interaktionsterm der Faktoren Handmodell $\times$ Tiefenebene war dagegen nicht signifikant mit $F(4; 48) 2,531$; $p = 0,051$, $\eta^2 = 0,174$. Die Erwartung, dass für Zeigebewegungen aller Handmodelle unterschiedliche Bewegungszeiten für jede Tiefenebene gemessen werden, kann somit nicht bestätigt werden und Nullhypothese H_6 wird angenommen. In einem posthoc durchgeführten paarweisen Test mit Bonferroni-Korrektur der Einzelfaktoren wurde ein signifikanter Effekt ($p = 0,048$) für den Vergleich der Tiefenebenen Mitte und Hinten gefunden ($239,597$; 95%-CI[1,6; 477,594]). Die Tiefenebenen für Handmodell M_3 zeigen für die gemessenen Werte kürzere Bewegungszeiten für die Tiefenebene Hinten ($M = 1863,2603$; $SD = 195,4385$), für die Tiefenebene Mitte ($M = 2240,7246$; $SD = 239,9923$) und Tiefenebene Vorne ($M = 2374,1635$; $SD = 197,3053$) nahmen die Zeitwerte jeweils zu. Eine ANOVA für die gemessenen Bewegungszeiten pro Faktor Tiefenebene für Handmodell M_3 ergab, dass hier ein signifikanter Effekt vorliegt, $F(2; 24) 21,938$; $p < 0,001$; $\eta^2 = 0,646$. In einem Bonferroni-korrigierten posthoc Test bestätigte sich ein signifikanter Effekt in den Messdaten für Bewegungszeiten zwischen den Tiefenebenen Vorne und Hinten ($p < 0,001$) mit ($510,903$; 95%-CI[284,273; 737,533]) sowie zwischen Mitte und Hinten ($p = 0,003$) mit ($377,464$; 95%-CI[136,066; 618,862]). Damit wird Nullhypothese H_7 angenommen, da die gemessenen Bewegungszeiten für die Tiefenebene Hinten kürzer sind.

Um zu prüfen, ob Zielobjekte mit gleicher Größe in der hinteren Tiefenebene leichter zu treffen sind, als in der vorderen Tiefenebene, werden Zielobjekte mit gleichem Index of Difficulty, die in auf jeweils auf eine der Tiefenebene lagen, direkt miteinander verglichen. Zielobjekte Neun und Zehn erfüllen diese Kriterien und

Tabelle 4.2: Deskriptive statistische Auswertung für die Bewegungszeit in Millisekunden für jedes der drei Handmodelle in den drei Tiefenebenen

Handmodell	Mittelwert	Standardabweichung
M ₁ Vorne	2136,6633	378,610 08
M ₂ Vorne	2081,3322	411,930 99
M ₃ Vorne	2374,1635	197,305 15
M ₁ Mitte	2060,8978	238,411 71
M ₂ Mitte	1922,9762	293,622 92
M ₃ Mitte	2240,7246	239,992 28
M ₁ Hinten	1894,8014	304,125 74
M ₂ Hinten	1755,0479	278,145 04
M ₃ Hinten	1863,2603	195,438 45

werden für den Vergleich ausgewählt. Da die Messdaten nach einem Shapiro-Wilk-Test normalverteilt sind, wurde eine messwiederholte Varianzanalyse berechnet. Ein Mauchly-Test ergab, dass keine Verletzung der Sphärizität vorliegt. Die gemessenen Bewegungszeiten waren für Handmodell M₂ in der hinteren Tiefenebene am niedrigsten ($M = 1740,6200$; $SD = 400,4966$), alle weiteren gemessenen Werte weichen nicht stark voneinander ab und sind in Tabelle 4.3 dargestellt. Die berechnete Varianzanalyse mit Messwiederholung zeigt keinen signifikanten Unterschied in den Bewegungszeiten des Faktors Handmodell $F(2; 20) = 1,022$; $p = 0,378$; $\eta^2 = 0,93$. Der Faktor Tiefenebene zeigte im Vergleich für die Zielobjekte Neun und Zehn keinen signifikanten Effekt $F(1; 10) = 0,9490$; $p = 0,3530$; $\eta^2 =$. Die Interaktion der Faktoren Handmodell $\times$ Tiefenebene war ebenfalls nicht signifikant $F(2, 20) = 2,7840$; $p = 0,8600$; $\eta^2 = 0,2180$. Für Zielobjekte in der hinteren Tiefenebene konnten somit keine signifikant besseren Bewegungszeiten gemessen werden und die Nullhypothese H_8 wird angenommen.

Mentale und körperliche Beanspruchung Die mentale Beanspruchung wurde subjektiv nach jedem Zeigeaufgabenblock pro Handmodell mit der „Rating Scale of Mental Effort“ erfasst. Die gemessenen Daten erwiesen sich nach einem Shapiro-Wilk-Test als normalverteilt, ein Mauchly-Test ergab, dass keine Verletzung der Sphärizität vorliegt. Die niedrigste mentale Beanspruchung wurde für Handmodell M₁ erfasst

Tabelle 4.3: Deskriptive statistische Auswertung der Bewegungszeit in Millisekunden nach Tiefenebenen für jedes der drei Handmodelle.

Handmodell & Tiefenebene	Mittelwert	Standardabweichung
M ₁ Vorne	2126,5610	424,0786
M ₂ Vorne	2062,0455	524,9767
M ₃ Vorne	2169,4555	835,4910
M ₁ Hinten	1740,6200	400,496 60
M ₂ Hinten	2090,0009	387,9285
M ₃ Hinten	2237,8791	292,7465

(M = 24,308; SD = 3,845), dann folgen Handmodell M₃ (M = 25,231; SD = 4,274) und Handmodell M₂ (M = 25,923; SD = 4,291). Auf der RSME-Skala liegen die subjektiven Werte auf dem Abschnitt der Skala, welche mit der Klassifizierung „ein wenig Anstrengung“ klassifiziert ist. Eine deskriptive Auswertung zeigt, dass die Abweichungen für Handmodell M₂ leicht höher liegen, dargestellt in Abbildung 4.16. Im dort dargestellten Boxplot ist zu erkennen, dass der Median-Wert für alle drei Handmodelle zwischen den Klassifizierungen „fast keine Anstrengung“ und „ein wenig Anstrengung“ liegen. Ein statistisch signifikanter Unterschied konnte nicht festgestellt werden, $F(2, 24) = 0,2420$; $p = 0,7870$; $\eta^2 = 0,0200$. Die Aufgabenbearbeitung war demnach mit Handmodell M₃ subjektiv nicht signifikant höher als die Aufgabenbearbeitung mit Handmodell M₁ und Handmodell M₂. Nullhypothese H₉ wird angenommen.

Zur Bestimmung eines Zusammenhanges zwischen der subjektiv empfundenen mentalen Beanspruchung mit den gemessenen Bewegungszeiten pro Handmodell wurde eine Korrelationsanalyse für jedes einzelne Handmodell durchgeführt. Dazu wurden die gemessenen Bewegungszeiten für jedes Handmodell kumuliert und ein Mittelwert gebildet, der jeweils mit den gemessenen Daten der „Rating Scale of Mental Effort“ auf eine Korrelation nach Pearson untersucht. Die subjektive mentale Beanspruchung und die gemessenen Bewegungszeiten korrelierte stark positiv für Handmodell M₂, $r = 0,733$; $p = 0,04$. Für die Handmodelle M₁ und Handmodell M₃ konnte keine Korrelation festgestellt werden. Die Nullhypothese H₁₀ wird demnach für Handmodell M₁ und M₃ angenommen. Für Handmodell M₂ wird die Nullhypothese H₁₀ abgelehnt.

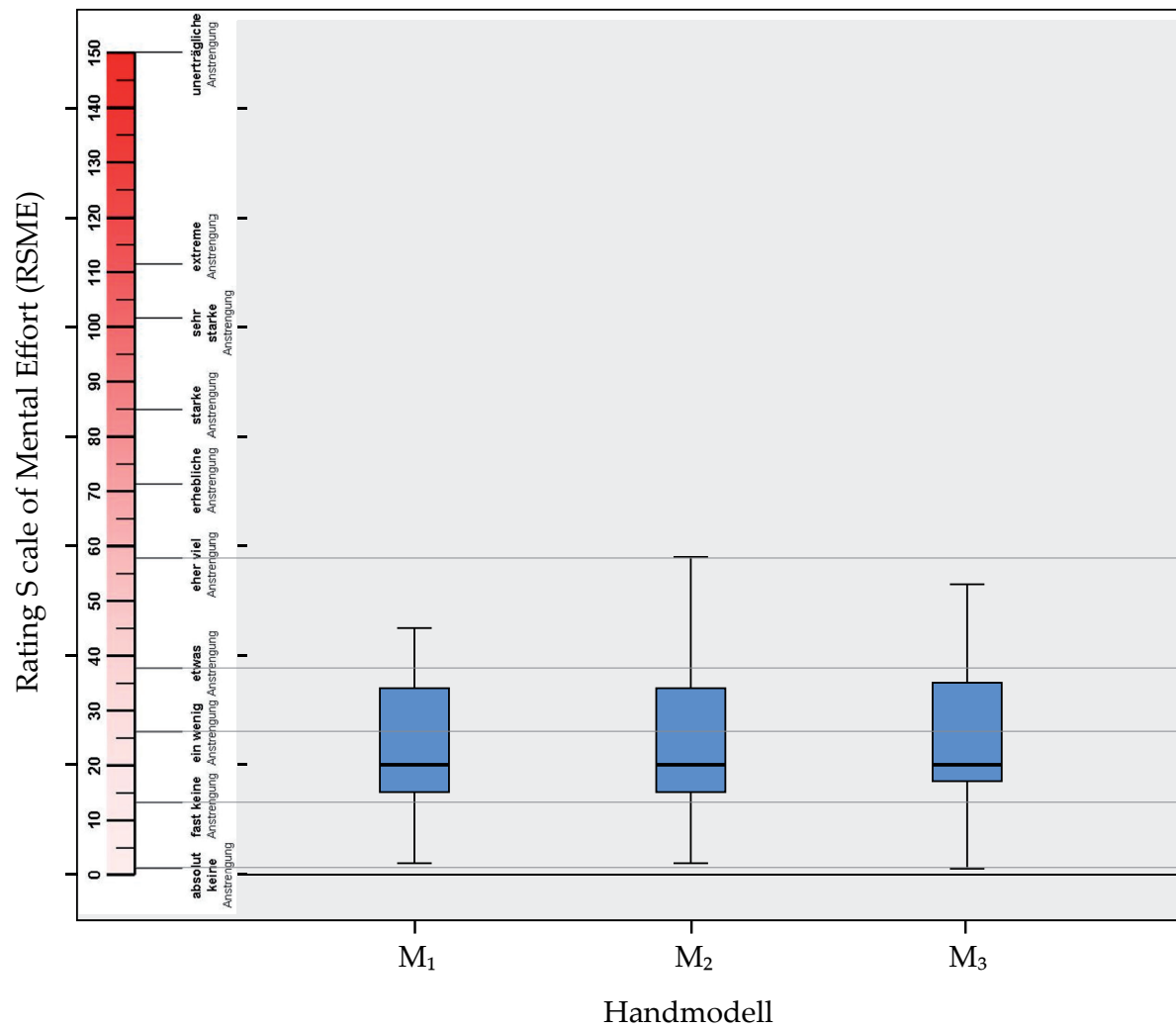


Abbildung 4.16: Ergebnisse der mentalen Belastung für die drei Handmodelle auf der RSME Skala

Tabelle 4.4: Deskriptive Statistik für Borg RPE Skala nach Messzeitpunkt

Messzeitpunkt	Mittelwert	Standardabweichung
1. Durchgang	10,69	1,80
2. Durchgang	11,31	2,06
3. Durchgang	11,38	2,18

Die subjektive körperliche Beanspruchung wurde während der Durchführung des Versuchs subjektiv über eine „Borg Ratingscale of Physical Exertion“ erfasst und vom Versuchsteilnehmer nach jedem permutierten Block, also nach jeweils 45 Zeigebewegungen, ausgefüllt. Da zu Beginn des Versuches kein Initialwert aufgezeichnet wurde und damit kein Vergleichswert vor Versuchsbeginn existiert, wird geprüft, ob über den Faktor Zeit eine signifikante Steigerung über die jeweils vorgenommenen Messungen vorliegt. Jeder Block mit 45 Zeigebewegungen dauerte etwa vier Minuten. Die unterschiedlichen Visualisierungen des Handmodells waren über den Versuch permutiert, die zum Treffen der Ziele erforderliche Bewegung war jedoch für jeden Durchlauf gleich. Deskriptiv ist eine steigende Varianz der Daten über die drei Messzeitpunkte erkennbar, wie in Abbildung 4.17 und Tabelle 4.4 dargestellt. Gemäß eines Shapiro-Wilk-Tests waren die Daten normalverteilt, $p > 0,05$. Ein Mauchly-Test ergab, dass keine Verletzung der Sphärizität vorlag. Es liegt kein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den einzelnen Messzeitpunkten für die subjektive körperliche Beanspruchung vor, $F(2, 24) = 1,960$; $p = 0,163$. Nullhypothese H_{11} wird damit angenommen.

Tabelle 4.5 zeigt eine Korrelationsanalyse nach Pearson des Faktors „Bewegungszeit“ des Handmodells M_3 mit den drei Fleishman-Faktoren „Unruhe“, „Präzision“ und „Geschwindigkeit“ aus der motorischen Leistungsserie (Neuwirth & Benesch, 2004) sowie des Faktors „Räumliches Vorstellungsvermögen“ (Meyer, Mertens, Dzaack & Schlick, 2016a). Das räumliche Vorstellungsvermögen der Versuchsteilnehmer wurde über den dreidimensionalen Würfeltest von Gittler (1990) erfasst. Zwar ist keine der dort untersuchten Korrelationen signifikant, es besteht jedoch eine schwache, negative Korrelation zwischen den Faktoren „Räumliches Vorstellungsvermögen“ und „Bewegungszeit“. Nullhypothese H_{12} wird aufgrund der fehlenden Signifikanz angenommen.

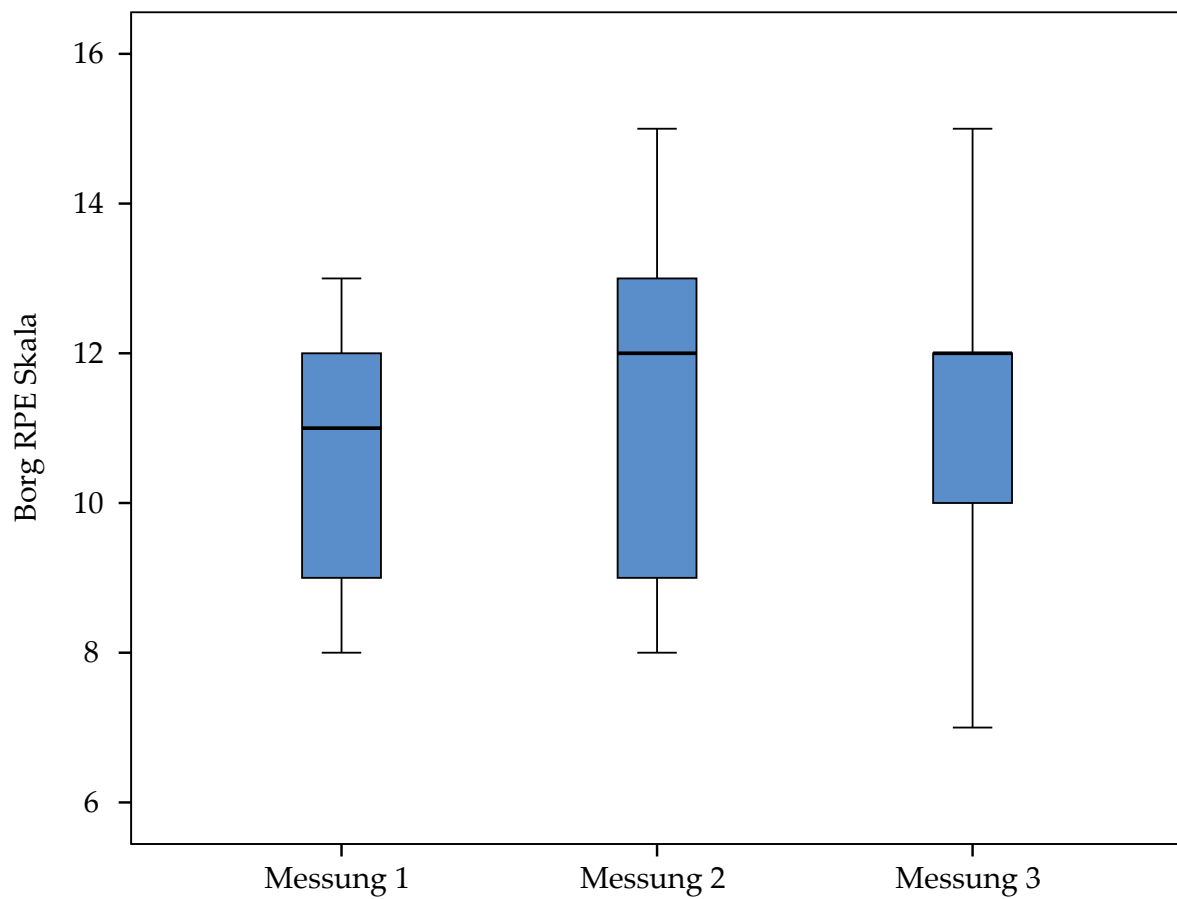


Abbildung 4.17: Deskriptive Analyse der physischen Beanspruchung mit der Borg-Skala

Tabelle 4.5: Bivariate Korrelationsanalyse mit abhängigen Variablen aus Vortest (vgl. Meyer, Mertens, Dzaack und Schlick (2016a))

		1	2	3	4	5
Bewegungszeit(ms)	1					
Unruhe	2	−0,01				
Präzision (Mot. Leistungsserie)	3	0,04	0,41			
Geschwindigkeit (Mot. Leistungsserie)	4	−0,19	−0,24	−0,42		
Räuml. Vorstellungsvermögen	5	−0,42	−0,01	0,15	0,31	

Tabelle 4.6: Deskriptive Ergebnisse des „Simulator Sickness Questionnaire“ im Vortest und während der Ausführung der Aufgaben mit Handmodell M₁, M₂ und M₃

Kondition	Mittelwert	Standardabweichung
Vorversuch	2,38	1,94
Handmodell M ₁	3,15	1,82
Handmodell M ₂	2,69	1,89
Handmodell M ₃	3,38	1,66

Tabelle 4.6 zeigt die deskriptive Auswertung für die Daten des „Simulator Sickness Questionnaire“ für Handmodelle M₁, M₂ und M₃ sowie die aufgezeichneten Daten aus dem Vorversuch. Handmodell M₂ zeigt einen niedrigeren Mittelwert als die Handmodelle M₁ und M₃. Alle Handmodelle zeigen einen höheren Mittelwert, als die Basislinie aus dem Vorversuch. Auch aus den deskriptiven Daten geht eine leichte Steigerung hervor (vgl. Abbildung 4.18). Da die Daten des „Simulator Sickness Questionnaire“ sich nach einem Shapiro-Wilk-Test für den Faktor „Vortest“ als nicht normalverteilt erwiesen, wurde mit einem nicht-parametrischen Verfahren geprüft, ob signifikante Unterschiede in den Messdaten vorliegen. Hierzu wurde der Friedman-Test eingesetzt, mit dem keine Signifikanz zwischen den Messergebnissen festgestellt werden konnte, $\chi^2(2) = 4,62; p = 0,100$. Nullhypothese H₁₃ wird damit angenommen.

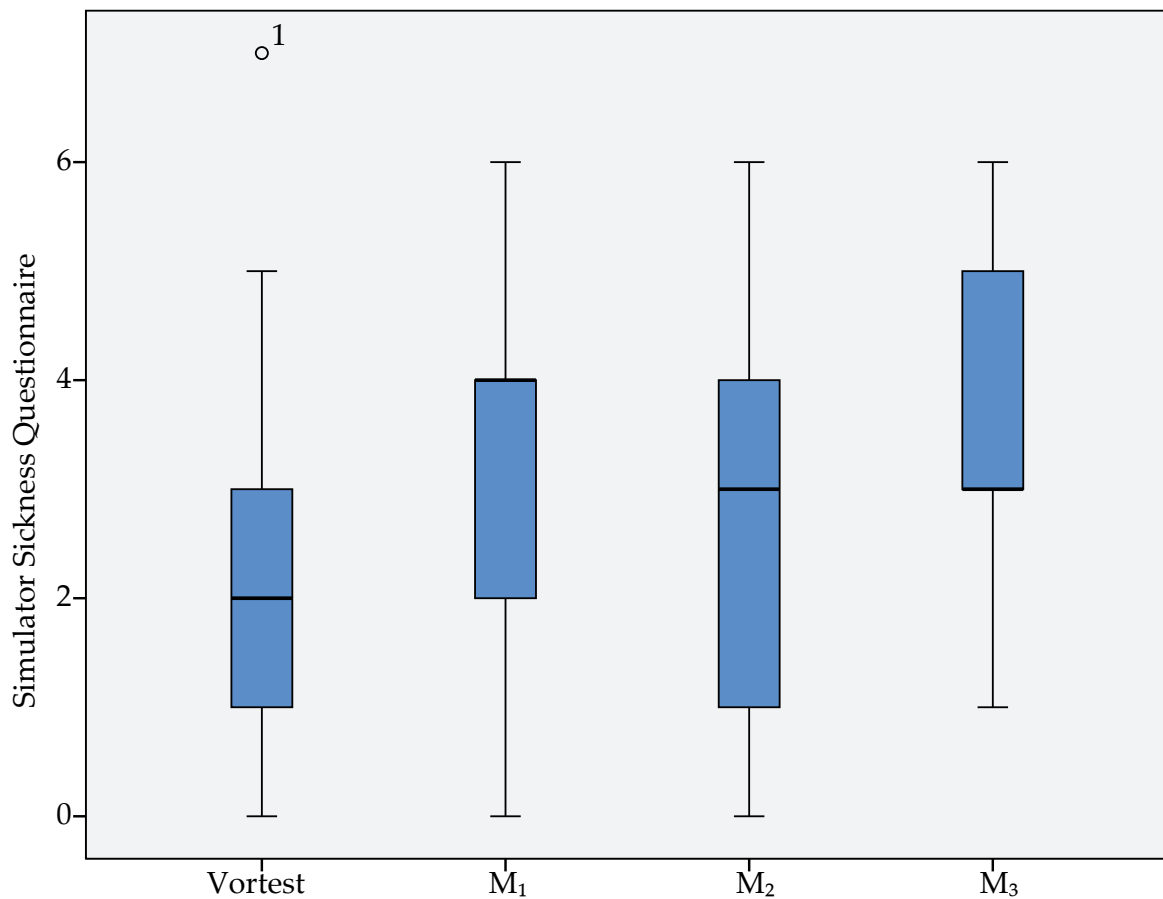


Abbildung 4.18: Boxplot der Ergebnisse für den „Simulator Sickness Questionnaire“ mit Daten aus Vorversuch als Baseline

Um Ermüdungserscheinungen der Augen separat für Handmodell M_3 zu untersuchen, wurde der entsprechende Faktor „Ermüdungserscheinungen der Augen“ aus dem „Simulator Sickness Questionnaire“ isoliert und separat für Handmodell M_3 ausgewertet. Da hier durch den Shapiro-Wilk-Test keine Normalverteilung der Messdaten festgestellt werden konnte, wurden die Messdaten mit einem Friedman-Test auf Signifikanz überprüft. Der Friedman-Test gilt als nicht-parametrische Alternative zur ANOVA mit Messwiederholung. Die Messdaten waren nicht signifikant, $\chi^2(2) = 1,33; p = 0,513$. Da keine signifikanten Ermüdungserscheinungen der Augen mit der Benutzung von Handmodell M_3 auftreten wird die Nullhypothese H_{14} angenommen.

4.2.10 Diskussion

Versuchsreihe A zielte darauf ab, ein möglichst minimalistisch gestaltetes Handmodell zur Benutzung in der stereoskopischen Seekarte einzusetzen. Um die Untersuchung des Handmodells so wenig wie möglich zu verfälschen, wurden alle Tiefenhinweise, die nicht zum Handmodell und zum Start- bzw. Zielobjekt gehören, aus der stereoskopischen Visualisierung entfernt und auf den Hintergrundgradienten reduziert. Untersucht wurden drei verschiedene Faktorstufen Handmodell, wobei zwei Faktorstufen einem Stäbchenmodell entsprachen und eine Faktorstufe einem Punktwolkemodell entsprach. Die Hauptannahme in Versuchsreihe A war, dass sich die Benutzung des Punktwolkemodells nicht signifikant von der Benutzung der Stäbchenmodelle unterscheidet. Hierzu wurde eine Versuchsumgebung mit einer Fitts'schen Zeigeaufgabe implementiert, welche Ziele mit insgesamt drei verschiedenen Tiefenebenen bereitstellte. Die Zielobjekte waren kugelförmig. Durch die Eindimensionalität der Zielobjekte war die Möglichkeit gegeben, die ursprüngliche Formulierung für Eindimensionale Ziele von Paul Fitts zur Berechnung der „Indices of Difficulty“ zu verwenden. Mit einer Stichprobe von insgesamt 13 Teilnehmern wurden die drei Handmodelle mit verschiedenen unabhängigen Variablen untersucht. Hierbei wurden die kumulierte Bewegungszeit von Berührung des Start- zum Zielobjekt sowie die kumulierte Bewegungszeit pro Tiefenebene und Handmodell im System erfasst und für die Berechnungen des „Index of Difficulty“ nach Fitts verwendet. Pro Handmodell wurde weiter die RSME-Skala zur Erfassung der subjektiven mentalen Beanspruchung bei der Benutzung verwendet. Die aufgezeichneten

Versuchsergebnisse wurden teilweise mit den Ergebnissen aus dem Vorversuch in Relation gebracht. Dies waren der „Simulator Sickness Questionnaire“ zur Erfassung des Wohlbefindens des Versuchsteilnehmers „in-situ“ und vor dem Versuch, die über das Wiener Testsystem berechneten Fleishman-Faktoren aus der Motorischen Leistungsserie sowie der Würfelaufgaben-Test als Vortest zur kognitiven Leistung und des räumlichen Vorstellungsvermögens. Der durchgeführte Versuch wurde als faktorielles innersubjekt-Design umgesetzt, wobei der Faktor Handmodell in drei Stufen variiert wurde.

Als wesentliches Maß zur Bewertung der Performanz der unterschiedlichen Visualisierungsstufen war die Zeitmessung zwischen Aktivierung des Startobjektes und Aktivierung des Zielobjektes in der nach Fitts gestalteten Zeigeaufgabe auf kugelförmige Ziele in drei Tiefenebenen. Hier konnte gezeigt werden, dass zwischen Handmodell M_3 und Handmodell M_2 signifikante Unterschiede in der Bewegungszeit über den gesamten Versuch auftraten (Bewegungszeit $M_2 >$ Bewegungszeit M_3). Für Handmodell M_1 konnte kein signifikanter Unterschied zu Bewegungszeit M_2 und Bewegungszeit M_3 festgestellt werden, obwohl die Visualisierung der von Bewegungszeit M_2 ähnlich war, jedoch über dickere Verbindungsstäbchen sowie eine kräftigere Visualisierung der Gelenkpunkte verfügte. Modell M_2 war demnach eine filigrane Darstellung, welche noch Rückschlüsse auf die Verbindung der einzelnen Gelenkpunkte zulässt, auch wenn das Handmodell in Ruhestellung verbleibt. Die Berechnung des linearen Zusammenhangs des Index of Difficulty zur Bewegungszeit ergab, dass über alle Visualisierungen des Handmodells eine Steigung über den ID vorliegt. Die Berechnung des Bestimmtheitsmaßes über die Datenreihen der Mittelwerte der Bewegungszeiten pro Handmodell ergab jeweils stärkere Werte für die Handmodelle M_1 und M_2 mit jeweils $M_1 = 0,65$ und $M_2 = 0,67$, während das Bestimmtheitsmaß für Handmodell M_3 gerade mal bei 0,19 lag. Es ist für Handmodell M_3 also von einer stärkeren Streuung der Mittelwerte über den Linearen Zusammenhang auszugehen. Dennoch bestätigte sich über alle gemessenen Werte mit steigendem Index of Difficulty eine steigende Bewegungszeit. Da die ID-Werte über die Größe der Zielobjekte über die Pixelgenaue Darstellung vom Betrachtungspunkt des Versuchsteilnehmers berechnet wurden, in der Tiefe jedoch in drei Ebenen unterschiedlich angeordnet waren, unterschied sich die Größe der Zielobjekte nicht nur in ihrem eigentlichen Kugeldurchmesser, sondern ebenfalls durch die jeweilige Tiefe des Zielobjektes durch die perspektivische Darstellung. Für die jeweiligen Tiefenebenen wurde der lineare

Zusammenhang zwischen Index of Difficulty und Bewegungszeit daher für jede Tiefenebene einzeln ausgewertet. Dabei ergaben sich für die Handmodelle M₁ und M₂ jeweils recht hohe Werte im Bestimmtheitsmaß für die hintere Tiefenebene von M₁ $R^2 = 0,885$ und M₂ $R^2 = 0,96$, während Handmodell M₃ für die hintere Tiefenebene sehr schlecht abschnitt, mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,005$. Für die mittlere Tiefenebene lagen die Bestimmtheitsmaße für die Handmodelle M₁ $R^2 = 0,760$ und M₂ $R^2 = 0,760$ gleichauf, wobei das Handmodell M₃ schlechter abschnitt mit M₃ $R^2 = 0,257$. Für die Tiefenebene Vorne ist für Handmodell M₃ der lineare Zusammenhang zwischen ID und Bewegungszeit mit $R^2 = 0,160$ ebenfalls als geringfügig einzustufen und liegen für M₁ bei $R^2 = 0,786$ und M₂ bei $R^2 = 0,580$. Da die Bewegungszeiten für Handmodell M₂ schneller sind, als für Handmodell M₁ und M₃, ist davon auszugehen, dass im angewendeten Versuchsszenario mit Handmodell M₂ die performantesten Ergebnisse aus Sicht der gemessenen Zeit zum Treffen der Zielobjekte erzielt wurden. Auch bei gleicher Zielgröße in unterschiedlicher Entfernung wurden bessere Ergebnisse mit Handmodell M₂ als mit den Modellen M₁ und M₃ erzielt, es ist jedoch zu beachten, dass hier zwar deskriptiv bessere Mittelwerte für M₂ vorliegen, das Ergebnis jedoch nicht signifikant war. Handmodell M₃ war besonders schwierig für Zielobjekte der vorderen Tiefenebene weniger geeignet, um hier Ziele adäquat zu treffen. Dies kann an fehlenden Tiefenhinweisen liegen, welche im Modell M₃ auf das Minimum reduziert wurden. Je weiter das Modell nach vorne in der stereoskopischen Visualisierung rückt, desto weiter liegen die dargestellten Gelenkpunkte auseinander und verlieren so ihren Bezug zueinander. Für Ziele auf der hinteren Tiefenebene wiederum ist die Standardabweichung der Mittelwerte für die Bewegungszeit von Handmodell MM₃ geringer als für jedes andere Handmodell in jeder anderen Tiefenebene, die gemessenen gemittelten Bewegungszeiten liegen dafür höher, als für Handmodelle M₁ und M₂. Dies könnte auf eine schlechtere Erkennbarkeit des Handmodells sein, wenn perspektivisch weiter hinten eingesetzt wird, also durch die gegebene Perspektive kleiner wirkt.

Die gemessene mentale Beanspruchung für die Handmodelle M₁ M₂ und M₃ ist nicht signifikant und lag für alle Handmodelle im Mittel auf der Skala zwischen „Fast keine Anstrengung“ und „Ein wenig Anstrengung“. Es wurde auch untersucht, ob die Bewegungszeiten im Zusammenhang mit der mentalen Beanspruchung stehen. Dies konnte für Handmodell M₂ bestätigt werden. Mit einem Anstieg der mentalen Belastung für Handmodell M₂ stieg also auch die mentale Beanspruchung. Diese

Beobachtung konnte für die Handmodelle M_1 und M_3 nicht gemacht werden. Weitere Korrelationsanalysen der Bewegungszeit mit den Vortests zur Stichprobenvalidierung zeigten, dass der Würfelaufgabentest für das Räumliche Vorstellungsvermögen leicht negativ mit der Bewegungszeit korreliert. Dies ist so zu interpretieren, dass Versuchsteilnehmer mit einem besseren räumlichen Vorstellungsvermögen geringere Bewegungszeiten für die Faktorstufen Handmodell beim Treffen der Ziele benötigten. Um die körperliche Belastung aus Sicht des Versuchsteilnehmers subjektiv bewerten zu können, wurden die Versuchsteilnehmer ihre aktuelle Belastung auf der Skala nach Borg nach jedem Durchgang zu kennzeichnen. Für jede Faktorstufe Handmodell entstand so ein Messzeitpunkt, der jedoch keine signifikanten Unterschiede bei der Auswertung brachte. Die Belastungswerte wurden von den Probanden für die Ausführung als sehr leicht bis leicht angegeben.

Als zusätzlicher möglicher Belastungsfaktor wurde der Simulator Sickness Questionnaire für die Auswertung des Wohlbefindens verwendet, die Ergebnisse des Fragebogens waren nicht signifikant und erzeugten keine erhöhten Werte. Die errechneten Gesamtpunkte wichen nur geringfügig von der Erfassung vor Benutzung der Versuchsumgebung ab und deuteten auf eine verschwommene Sicht der Versuchsteilnehmer während der Benutzung der stereoskopischen Versuchsumgebung hin. Dieses Phänomen ist jedoch durch die Verwendung der zeilenweise polarisierten Lichtfilter der Darstellungstechnik zu erklären, welche zur Erzeugung des stereoskopischen Bildes eingesetzt wurde. Es wurde angenommen, dass für Handmodell M_3 schlechte Werte im Simulator Sickness Questionnaire hervorrufen würde, diese Vermutung hat sich im Versuch jedoch nicht bestätigt.

4.3 Versuchsreihe B

In Versuchsreihe B wird das implementierte Konzept der in Kapitel Literaturdialoggestaltung entwickelten Dialogstruktur aus arbeitswissenschaftlicher Perspektive untersucht. Das Konzept eines Interaktionsdialoges als „Pie Menu“-Struktur hat sich in vorherigen Studien als robust erwiesen (vgl. Kapitel 3.4.4). Für die Bedienung des Interaktionsdialoges sollen verschiedene Methoden zur Auslösung von Dialogfeldern untersucht werden. Zur Bewertung wird eine arbeitswissenschaftliche Perspektive herangezogen, in der Performanz, Belastung und Beanspruchung berücksichtigt

werden. Dazu werden Zeitmessung und Beanspruchungsfaktoren bei den verschiedenen Bedienmöglichkeiten erfasst und ausgewertet. Als Bedienkonzept wurde eine naturalistische Interaktionsform mit einem virtuellen Handmodell gewählt. Eine wichtige Anforderung bei der Erstellung des Bedienkonzeptes war eine Erhaltung von Gestaltungsgrundlagen, wie sie bereits in vorhandenen Geoinformationssystemen besteht. Zur Manipulation von Daten wurde dazu eine klassische Interaktion mit Dialogfeldern über „Pie Menu“ Dialog. Diese wurde um naturalistische Interaktion ergänzt. Um die Gestaltung der Interaktionsdialoge und deren Bedienung aus arbeitswissenschaftlicher Perspektive zu bewerten, werden Performanz und Ergonomie in einer Probandenstudie untersucht. Es soll unter anderem geklärt werden, welche Relevanz der Tiefenfaktor bei der freihändigen Interaktion in stereoskopischen Desktopumgebungen hat, und ob Nutzer eine Ego- oder Allozentrische Anordnung bei der „Mid Air“-Interaktion in einer stereoskopischen Desktopumgebung bevorzugen. Das in Kapitel 3 zuvor beschriebene prototypische System dient dabei als Software-Rahmenwerk und Versuchsträger. Bei der Entwicklung der verschiedenen Konditionen für den Interaktionsdialog dienen die in Kapitel 3.4.4 beschriebenen Grundlagen. Untersucht werden sollen unterschiedliche Auslösungsmodalitäten für die beschriebene Dialoggestaltung, die als Konzept für den Einsatz in stereoskopischen Desktopumgebungen entwickelt wurde.

4.3.1 Ziel und Methodik

Die „Mid Air“-Interaktion in einer stereoskopischen Desktopumgebung stellt besondere Ansprüche an die Gestaltung von Interaktionsdialogen. In Versuchsreihe B gilt es, eine geeignete Manipulationsmethode zu finden, mit der durch einer Auswahl aus mehreren Möglichkeiten Eigenschaften an einem Objekt verändert werden können. In der klassischen Mensch-Computer-Interaktion passiert dies über einen Interaktionsdialog. Für die Interaktion in einer stereoskopischen Visualisierung wurde in Kapitel 3.4.4 ein Interaktionsdialog für stereoskopische Anzeigen entwickelt. Dieser soll im Kontext des Gesamtsystems nun in Versuchsreihe B evaluiert werden. Die Gestaltungsgrundlagen des im System umgesetzten Interaktionsdialoges sind in Kapitel 3.4.4 beschrieben. Das dort entwickelte und im Prototyp umgesetzte Konzept soll evaluiert werden. Dazu wurde ein repräsentativer Use Case aus den Ergebnissen der Experteninterviews ausgewählt.

Die grundlegende Form des Interaktionsdialoges als „Pie Menu“ ist radial und soll direkt und schnell ausführbar sein. Außerdem soll eine möglichst ergonomische Form der Bewegung bei Bedienung des Interaktionsdialoges gewährleistet sein, sowohl mental als auch körperlich. Da in der hier gewählten Form der Interaktionsdialog am Objekt erscheint, liegt dort auch das deiktische Zentrum des Interaktionsdialoges. Abgesehen von dem Vorteil, dass sich dadurch alle Möglichkeiten zur Interaktion direkt auf das ausgewählte Objekt beziehen können, ist auch physikalische Nähe vorhanden, durch die eventuelle Wegzeiten bei der Auswahl eines Dialoges kurz gehalten werden können. Auf die Gestaltung von Interaktionsdialogen wurde in Kapitel Literaturdialoggestaltung ausführlicher eingegangen. Auf dieser Basis wurde eine Dialogstruktur entwickelt, die auf dem Prinzip des „Pie-Menüs“ oder, zu deutsch, Tortenmenü basiert. Da diese Form des Interaktionsdialoges in der Dreidimensionalität mit einer Zeigebewegung bedient werden soll und die Art des Interaktionsdialoges zweidimensionalen Ursprungs ist, bieten sich zur Interaktion mehrere Möglichkeiten, welche ebenfalls in Kapitel 3.4.4 aufgezeigt werden. Grundsätzlich sind die „Pie Menüs“ so gestaltet, dass diese immer parallel zur Sichte Ebene erscheinen und eine tiefenunabhängige Größe haben. Das Grundkonzept ist gängigen Konzepten aus der Literatur entnommen. Es soll nun herausgefunden werden, welche Bewegungsbahn bei der Bedienung eines Interaktionsdialoges eine flüssige und fehlerfreie Bedienung ermöglicht. Es stehen zwei mögliche Bewegungsbahnen zur Auswahl, die sich an der Gestaltung der Dialogstruktur orientieren. Es werden drei unterschiedliche Möglichkeiten zur Auslösung des Interaktionsdialoges untersucht, die im Folgenden weiter ausgeführt sind.

1. Die Fingerspitze des Nutzers bewegt sich auf das zu verändernde Objekt zu, woraufhin das „Pie Menu“ allozentrisch oder egozentrisch angezeigt wird. Der Nutzer führt anschließend seine Zeigefingerspitze vom zu verändernden Objekt zurück. Um das „Pie Menu“ auslösen zu können, bewegt der Nutzer seine Fingerspitze schnell durch die zwei sichtbaren Ebenen von vorne nach hinten hindurch. Dazu ist ebenso eine feste, minimale Geschwindigkeit erforderlich, die vom System vorgegeben wird und bei 25mm pro Sekunde für die Auslösung festgelegt war. Werden die zwei sichtbaren Ebenen in dieser Mindestgeschwindigkeit durchdrungen, so wird der Interaktionsdialog ausgeführt. Die Ausrichtung der Interaktion findet relativ zur Sichte Ebene gesehen auf

der XZ-Ebene statt, also in die Tiefe des Sichtvolumens. Diese Kondition der Interaktion wird abkürzend als „Quick Intersection“ bezeichnet.

2. Die Fingerspitze des Nutzers bewegt sich auf das zu verändernde Objekt zu, woraufhin das „Pie Menu“ allozentrisch oder egozentrisch angezeigt wird. Nun führt der Nutzer seine Zeigefingerspitze vom zu verändernden Objekt vom zu verändernden Objekt zurück. Um das „Pie Menu“ auslösen zu können, bewegt der Nutzer seine Fingerspitze langsam durch die zwei sichtbaren Ebenen von vorne nach hinten hindurch. Dazu müssen beide Ebenen in der richtigen Reihenfolge, von vorne nach hinten, berührt werden, so wird der Interaktionsdialog ausgeführt. Die Ausrichtung der Interaktion findet relativ gesehen zur Sichtebe-
ne auf der XZ-Ebene statt, also in die Tiefe des Sichtvolumens. Diese Kondition der Interaktion wird abkürzend als „Slow Intersection“ bezeichnet.
3. Wie in Kondition eins und zwei bewegt sich die Zeigefingerspitze des Nutzers auf das zu verändernde Objekt zu, woraufhin das „Pie Menu“ allozentrisch oder egozentrisch angezeigt wird. Der Nutzer behält nun seine Fingerspitze in der Mitte des erschienenen „Pie Menus“, von der er nun seine Zeigefingerspitze in Richtung des Interaktionsfeldes ziehen kann, und dabei auf der XY-Ebene einen der möglichen Interaktionsdialoge durchkreuzt. Geschieht dies mit einer bestimmten Mindestgeschwindigkeit von 25mm pro Sekunde, so führt dies zu einer Ausführung des Interaktionsdialoges. Diese Form des Interaktionsdialoges wird abkürzend als „Swipe Out“ bezeichnet.

Die Funktionsweise der „Egozentrischen“ sowie der „Allozentrischen“ Anordnung des Interaktionsdialoges sind im Folgenden beschrieben.

- **Allozentrisch:** Die Dialogfelder im „Pie Menu“ werden so angeordnet, dass die Mitte des Kreisbogens, der über die Gesamtzahl der Dialogfelder im „Pie Menu“ bestimmt wird, im Lot auf dem mit dem Zeigefinger anvisierten Objekt steht. Die radiale Ausrichtung des „Pie Menus“ ist dabei für jedes aktivierte Objekt gleich. Zur Auslösung der Interaktionsfläche drei ist dadurch ein Richtungswechsel über einen spitzen Winkel α der Trajektorie der Zeigefingerspitze des Nutzers notwendig. Durch den spitzen Winkel ist eine starke Richtungsveränderung der Trajektorie der Zeigefingerspitze notwendig. Durch die Lot-Stellung

des Interaktionsdialoges gilt dies für mindestens eine Interaktionsfläche bei der Bedienung der drei dargestellten Interaktionsflächen, unabhängig davon, aus welcher Richtung der erscheinende Interaktionsdialog bedient werden soll.

- **Egozentrisch:** Für diese Kondition wird aus der Bewegungsbahn des Zeigefingers des Nutzers ein Vektor errechnet, über den ein Verdrehwinkel der „Pie Menu“-Struktur bestimmt wird. Die „Pie Menu“-Struktur wird entsprechend des Verdrehwinkels um die XZ-Achse auf der Sichtebeine rotiert, so dass die Oberkante des „Pie Menus“ in Richtung des Bewegungsvektors steht. Die radiale Ausrichtung des Interaktionsdialoges ist also von der Bewegung des Zeigefingers abhängig. Die Bewegungsrichtung zur Auslösung mit dem Zeigefinger des Nutzers ist Abbildung 4.20 veranschaulicht. Aus der Abbildung geht hervor, dass Winkel α bei den drei verwendeten Interaktionsflächen als stumpfer Winkel vorliegt, da die Richtungsänderung der Trajektorie für die drei vorhandenen Interaktionsflächen $> 90^\circ$ beträgt.

Über die insgesamt sechs Faktorstufen soll nun herausgefunden werden, welche der entwickelten Interaktionsformen zu einer effizienten Auslösung einer Interaktionsfläche in einem Interaktionsdialog in der Dreidimensionalität bei „Mid Air“-Interaktion mit einem virtuellen, versetzt gesteuerten Handmodell ermöglicht. Durch die Unterscheidung, ob ein „Pie Menu“ allozentrisch oder egozentrisch angezeigt wird, ergeben sich sechs unterschiedliche Konditionen oder Blöcke mit drei verschiedenen Auslösungsmöglichkeiten der Interaktionsdialoge, die mit zwei verschiedenen Ausrichtungen des „Pie Menus“ kombiniert werden. Das deiktische Zentrum liegt bei der Interaktion stets auf dem Objekt, welches es zu manipulieren gilt.

Auswahl des Szenarios Für die Manipulation des Objektes wurde ein Szenario gewählt, das einen Teil der Grundfunktionalität der stereoskopischen Seekarte abbildet. Diese Grundfunktionalität wurde in den Experteninterviews erwähnt und ist auch als wichtige Aufgabe in geographischen Informationssystemen als Grundfunktionalität von Relevanz. Die primäre Aufgabe, die mit der stereoskopischen Seekarte erfüllt werden soll, ist die Überwachung eines oder mehrerer Seegebiete. Die hier betrachtete, grundlegende Aufgabe in der stereoskopischen Seekarten besteht aus der Umklassifizierung eines sich in der 3D-Welt befindlichen Objektes mittels eines Interaktionsdialoges. Die Umklassifizierung eines Objektes in einer stereoskopischen

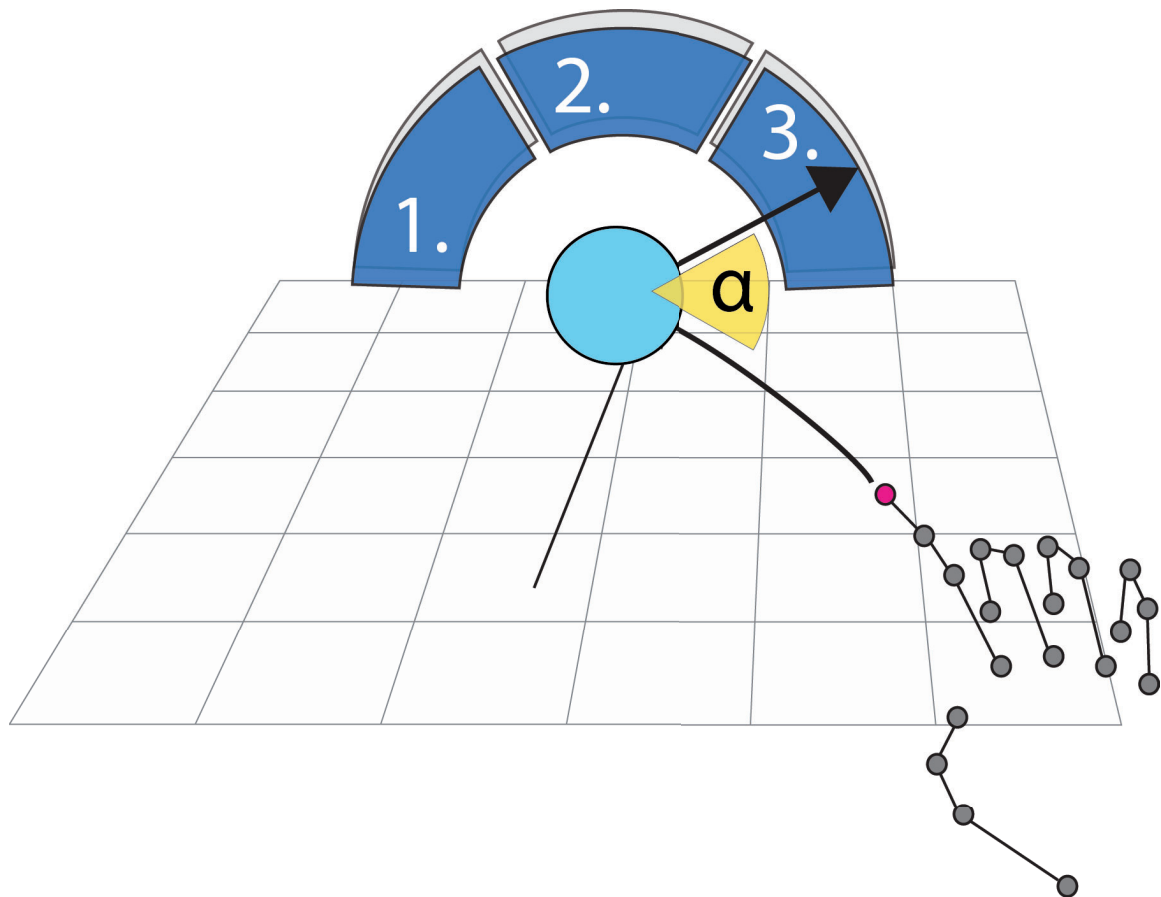


Abbildung 4.19: Beispielhafte Darstellung: Allozentrische Anordnung der Dialogstruktur am Zielobjekt

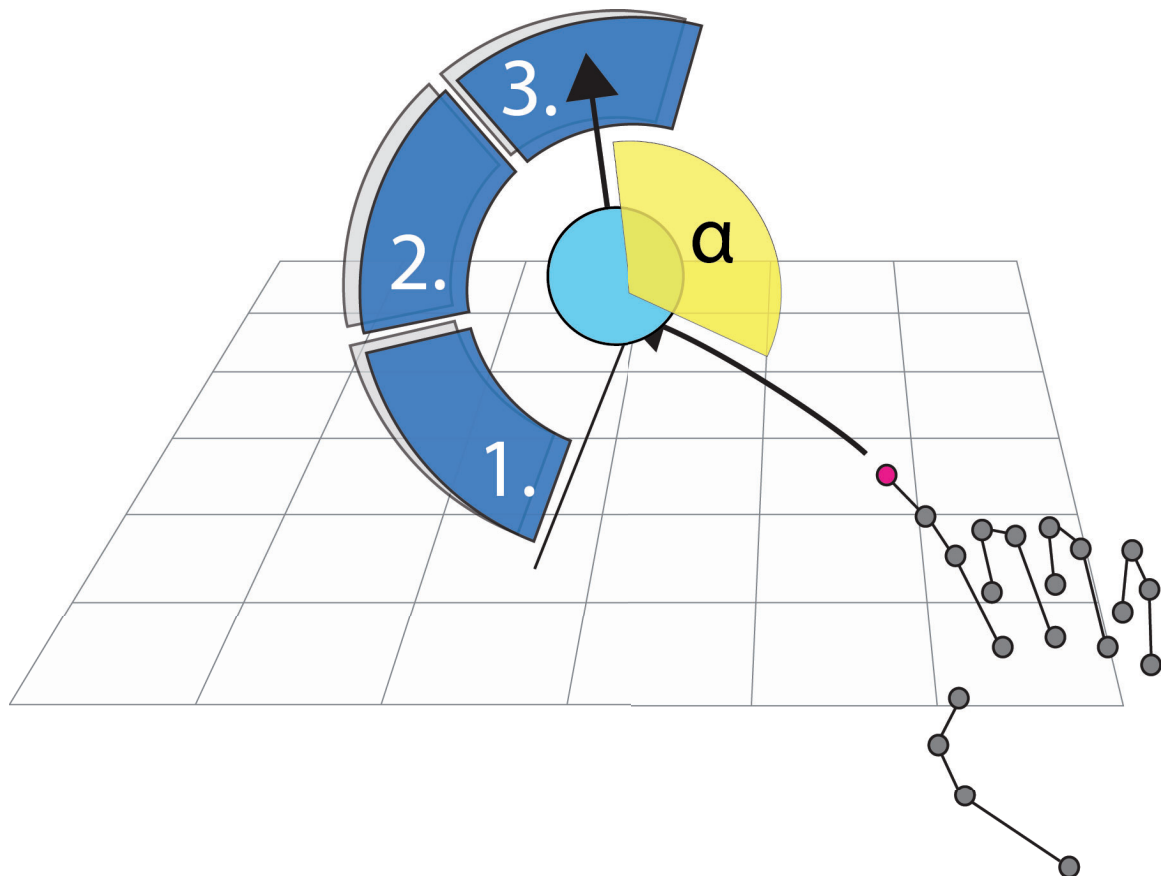


Abbildung 4.20: Beispielhafte Darstellung: Egozentrische Anordnung der Dialogstruktur am Zielobjekt

Seekarte muss entsprechend des Szenarios immer dann erfolgen, wenn weitere Beteiligte bei der Beobachtung des Kartenausschnittes auf ein Objekt aufmerksam gemacht werden sollen. Da die Aufgabe durch den Vergleich verschiedener Interaktionsdialoge insgesamt sechs Mal durchgeführt werden muss, wird das Szenario möglichst einfach definiert und besteht nur aus wenigen Interaktionsschritten. In zivilen Szenarien ist dies beispielsweise dann notwendig, wenn ein Wasserfahrzeug während eines Einlaufmanövers von zuvor abgesprochenen Trajektorien abweicht oder auffälliges Verhalten bei der Manöverdurchführung zeigt.

Einteilung in Ego- und Allozentriker Die Ausrichtung des Interaktionsdialoges soll als möglicher Einflussfaktor in der Untersuchung berücksichtigt werden. Dazu wird in einem Vortest untersucht, welche Strategie der jeweilige Versuchsteilnehmer anwendet, um sich in einer unbekannten Umgebung zurecht zu finden. Dazu wird der sogenannte „Tunnel Task“ von Gramann, Müller, Eick und Schönebeck (2005a) verwendet. In diesem online durchführbaren Test ² navigiert der Nutzer durch eine virtuelle Tunnelwelt, die aus geraden und kurvigen Segmenten besteht. Die Tunnelpassagen sind so gestaltet, dass der Versuchsteilnehmer aus der visuellen Information ausschließlich translatorische und rotatorische Veränderungen wahrnehmen kann. Im Anschluss wird der Versuchsteilnehmer gebeten, seine Endposition in Relation zur Anfangsposition zu nennen. Die Position kann vom Versuchsteilnehmer ausschließlich über das während des Versuches erstellte innere mentale Modell ³ für die Raumwahrnehmung bestimmt werden, da zum Zeitpunkt der Bestimmung keine Information mehr sichtbar ist. Die Position des Anfangspunktes soll über einen Pfeil bestimmt werden, dessen Winkel vom Versuchsteilnehmer eingestellt wird. Die über mehrere Durchläufe ausgewählten Daten wurden im Anschluss des Testverlaufs online ausgewertet und erlaubten eine Gruppierung in die strategischen Gruppen „Allozentriker“, „Egozentriker“ sowie „Gemischt“. Die Performanz, also die Richtigkeit der Einschätzung der Position nach jedem „Tunnel Task“ wurde ebenfalls erfasst.

Belastung und Beanspruchung während der Interaktion Für die Untersuchung der Beanspruchung der Muskulatur im Hand-Arm-Bereich wurden vier Muskeln gewählt,

²www.navigationexperiments.com/turningstudy.html

³Mentales Modell:

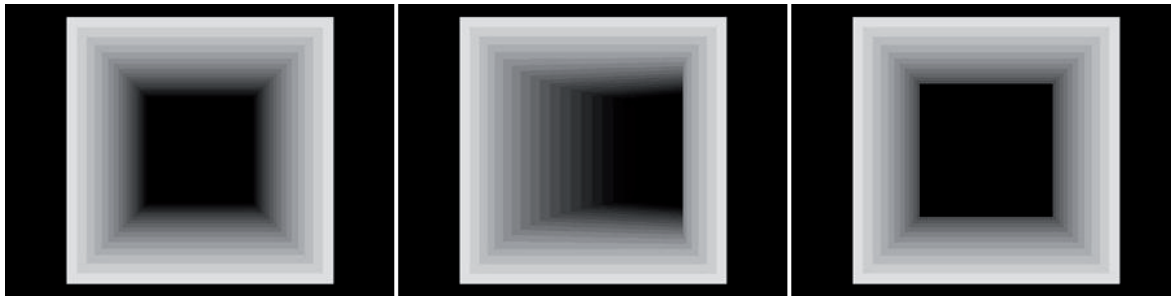


Abbildung 4.21: Beispielsequenz für den Versuchsteilnehmern gezeigte Tunnel im „Tunnel Task“ nach Gramman. Links: Beginn des Tunnels (geradeaus); Mitte: Traverser Tunnelabschnitt (Nach rechts abbiegen); Rechts: Endabschnitt des Tunnels (Tenbrink & Salwiczek, 2016).



Abbildung 4.22: Klebepunkte für Hand, Arm und Rücken

die im Folgenden aufgelistet sind. Es wurde jeweils davon ausgegangen, dass die Beanspruchung jeweils besonders ausgeprägt ist. Die anatomische Lage der jeweiligen Muskeln ist in Abbildung 4.1 veranschaulicht.

1. Trapezius pars descendenz
2. Deltoideus pars acromialis
3. Brachioradialis
4. Flexor Carpi Ulnaris
5. Interosseus Dorsalis I (manus)

Die unabhängigen Variablenstufen, die den Faktorstufen Ego-Allozentrisch x schnelle, langsame Intersektion und Swipe Out entsprechen, sind in Abbildung 4.23, 4.24, 4.25, 4.26, 4.27 und 4.28 dargestellt.

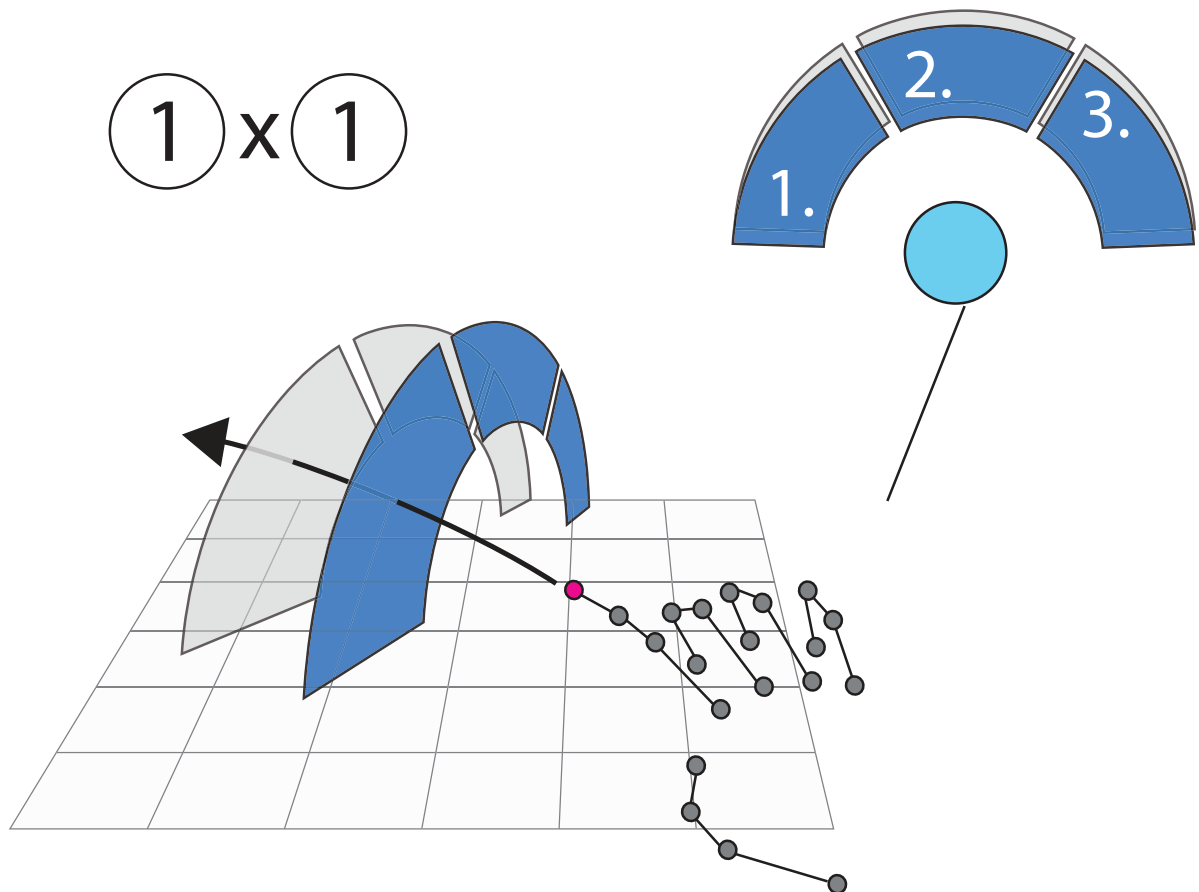


Abbildung 4.23: Dialogkondition 1 - 1: Allozentrisch und schnelle Intersektion:
„Quick Intersection Allozentrisch“

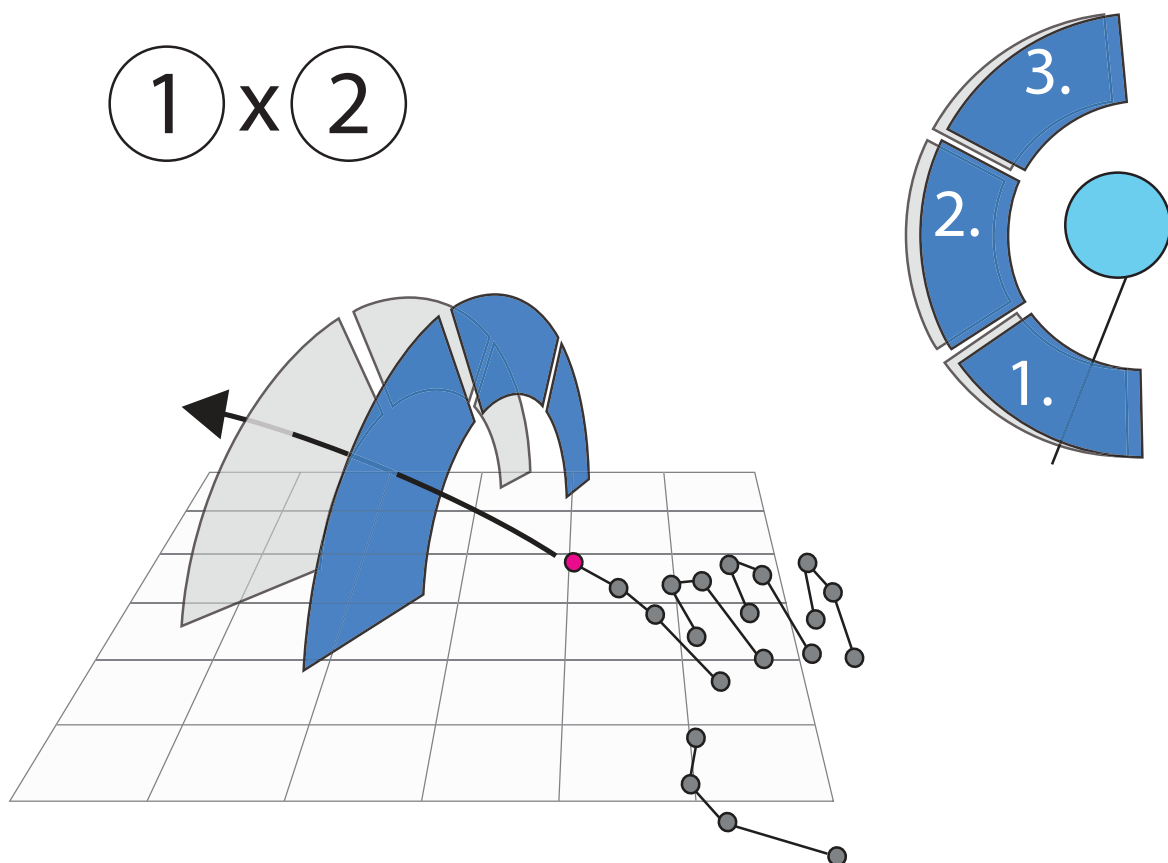


Abbildung 4.24: Dialogkondition 1 - 2: Egozentrisch und schnelle Intersektion: „Quick Intersection Egozentrisch“

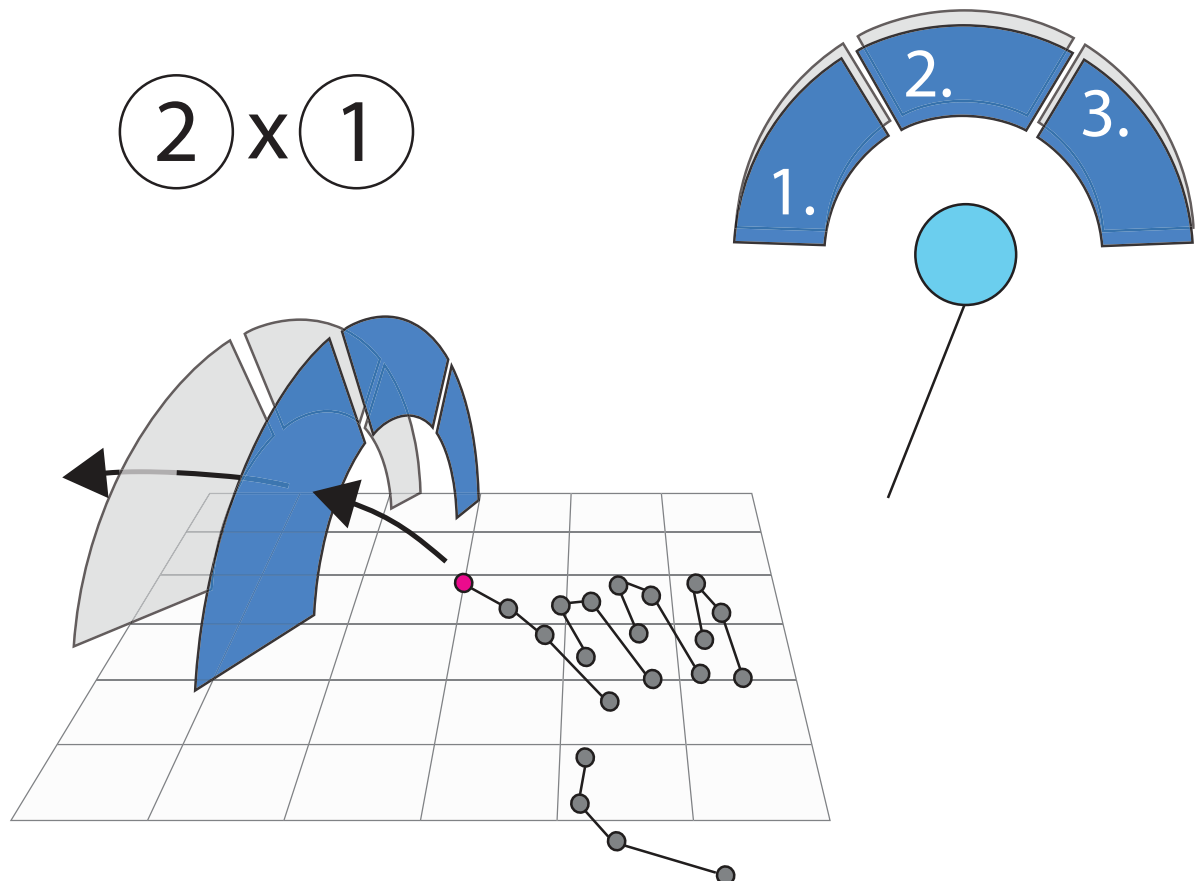


Abbildung 4.25: Dialogkondition 2 - 1: Allozentrisch und langsame Intersektion „Slow Intersection Allozentrisch“

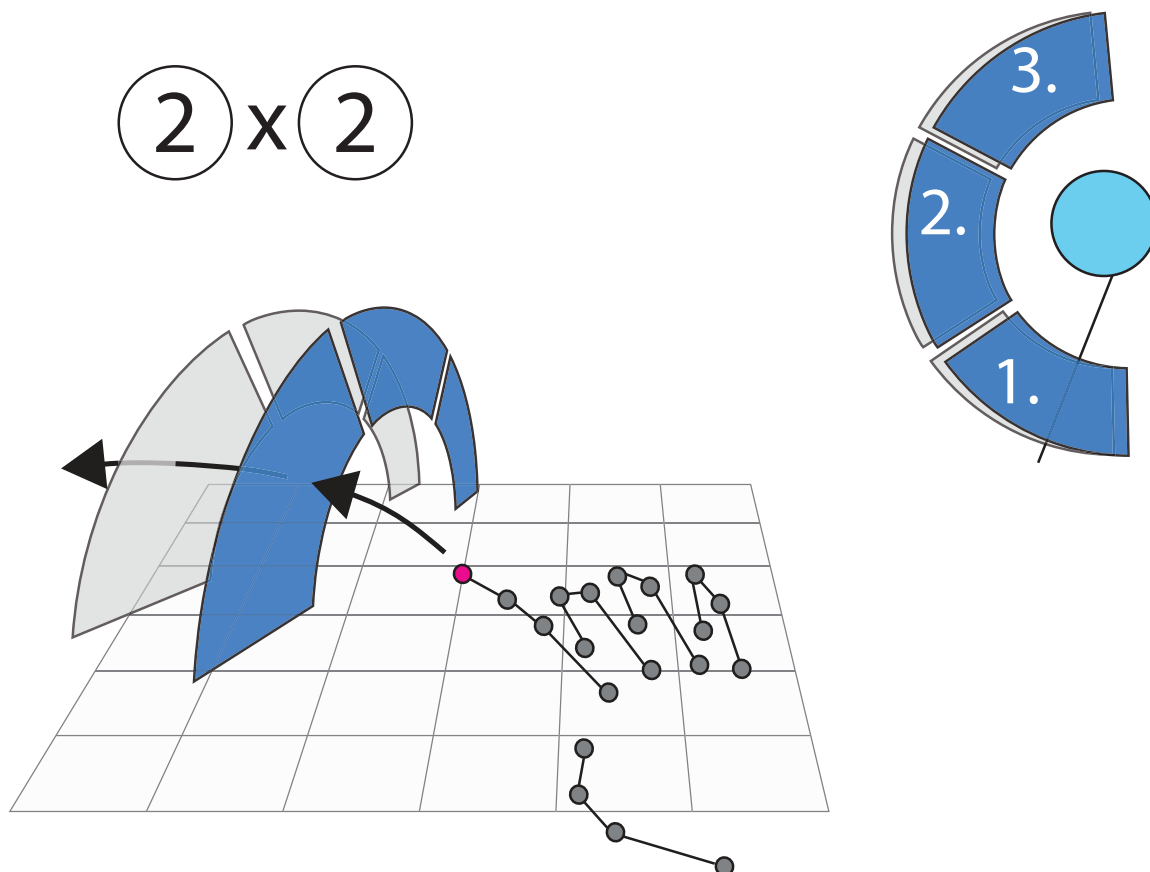


Abbildung 4.26: Dialogkondition 2 - 2: Egozentrisch und langsame Intersektion „Slow Intersection Egozentrisch“

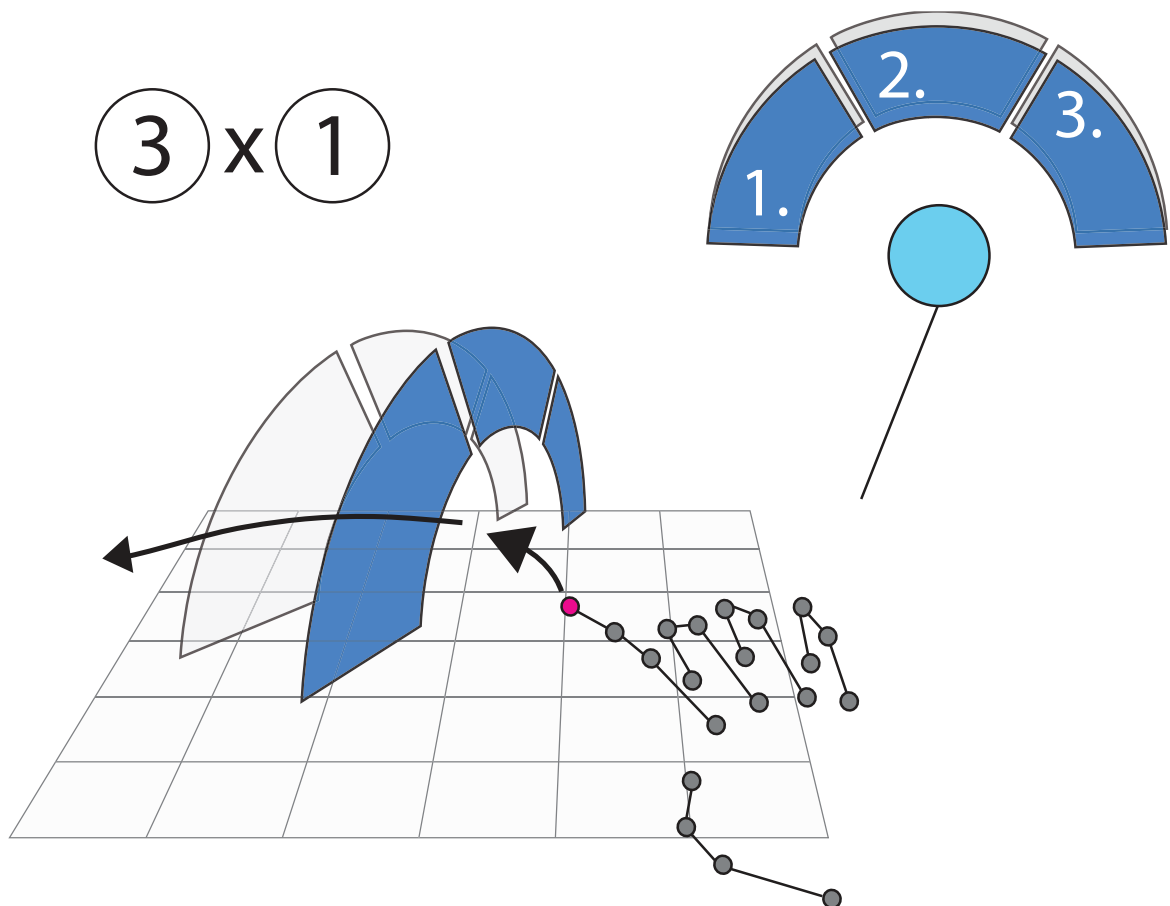


Abbildung 4.27: Dialogkondition 3 - 1: Allozentrisch und Swipe Out Bewegung:
„Swipe Out Allozentrisch“

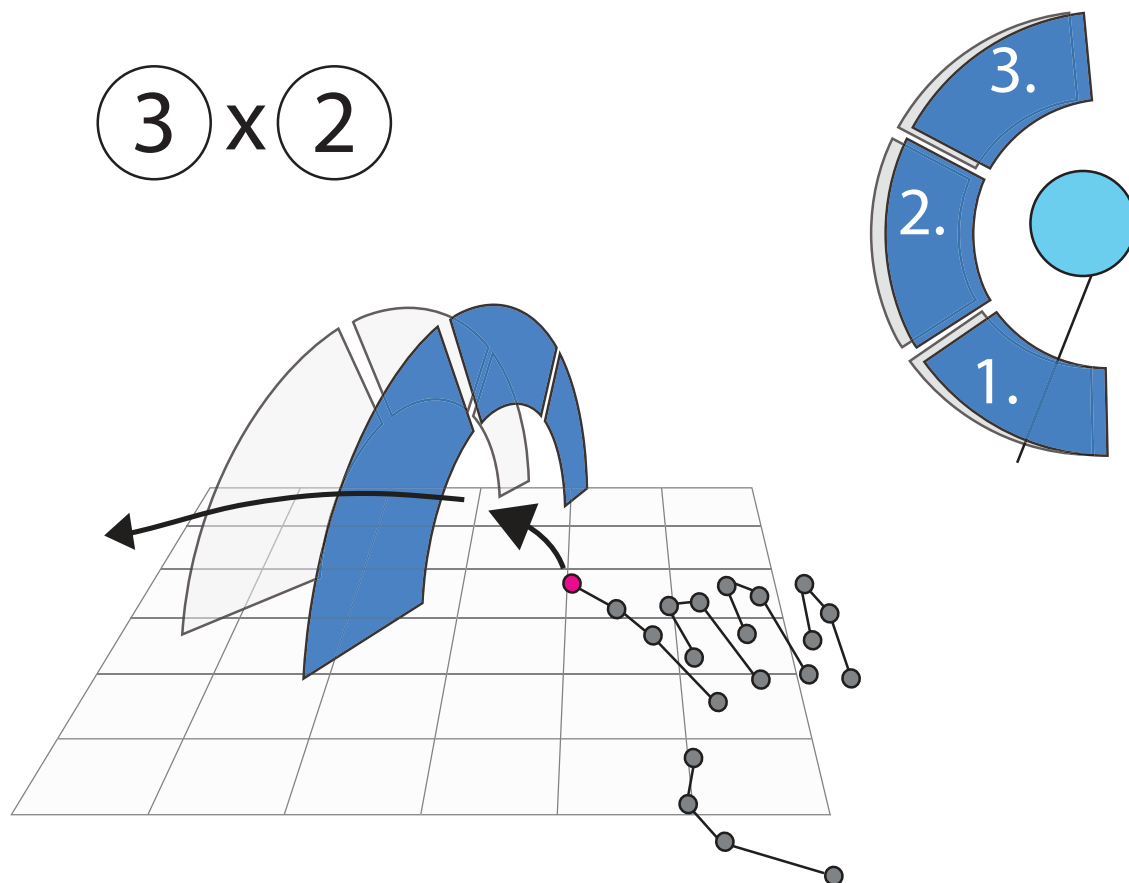


Abbildung 4.28: Dialogkondition 3 - 2: Egozentrisch und Swipe Out Bewegung: „Swipe Out Egozentrisch“

4.3.2 Versuchspersonen

Die Stichprobe in Versuchsreihe B bestand aus insgesamt 43 zufällig ausgewählten Personen zwischen 18 und 31 Jahren ($M = 22.7$; $SD = 3.3$) mit jeweils 28 weiblichen und 25 männlichen Teilnehmern, welche im weiten Umfeld der RWTH Aachen University akquiriert wurden. Die Versuchsteilnehmer nahmen freiwillig am Versuch teil und wurden für ihre Teilnahme bezahlt. Der Bildungsgrad der Versuchsteilnehmer war folgendermaßen verteilt: Ein Versuchsteilnehmer besaß mindestens die mittlere Reife (2,3%), 29 besaßen die Allgemeine Hochschulreife (67,4%) und 13 Versuchsteilnehmer hatten bereits einen Hochschulabschluss (20,3%). Die Stichprobe bestand aus Studenten sowie wissenschaftlichem und nicht-wissenschaftlichem Personal der RWTH Aachen University. Alle Versuchsteilnehmer wurden auf ihre motorischen Fähigkeiten mithilfe der Motorischen Leistungsserie des Wiener Testsystems über die Faktoren „Unruhe“ ($M = 51,93$; $SD = 6,07$), „Präzision“ ($M = 50,77$; $SD = 6,90$) und „Geschwindigkeit“ ($M = 48,33$; $SD = 7,348$) untersucht, sowie auf ihre Sehfähigkeit untersucht. In der Motorischen Leistungsserie erreichten die Versuchsteilnehmer Leistungsdaten mit einem ausreichenden Fleishman-Faktor von $T > 40$. In zwei Fällen wurden Werte $T < 40$ gemessen, was nach Fleishman (Fleishman & Ellison, 1962; Schuhfried, 2009) auf eine psychomotorische Störung hindeuten könnte, oder auf mangelnde Motivation in der Vortestreihe hindeutet. Da die weiteren Testergebnisse jedoch auf keine Anzeichen einer möglichen Störung hindeuteten, wurden die Teilnehmer in der Stichprobe belassen. Die Sehkraft der Teilnehmer betrug mindestens 80%. Zudem wurden die Probanden auf Farbsehen und Stereosehen untersucht. Alle 43 Teilnehmer führten den Versuch vollständig aus. Das räumliche Vorstellungsvermögen der Versuchsteilnehmer wurde über eine aktuelle Version des Würfeltestes von Gittler (1990) ermittelt. Für den Würfeltest wurden den Versuchsteilnehmern vor Beginn der Aufgabe zwei Beispiele gezeigt und eine Versuchsanweisung gelesen. Anschließend hatten die Versuchsteilnehmer 20 Minuten Zeit, um insgesamt 18 Würfelaufgaben zu lösen. Die Anzahl der richtig gelösten Würfelaufgaben in der Gesamtgruppe lag leicht über dem Mittleren Bereich ($M = 10,14$; $SD = 4,71$), die Anzahl der falsch gelösten Würfelaufgaben im unteren Bereich ($M = 5,65$; $SD = 4,5$). Alle 43 Versuchsteilnehmer führten den Gesamtversuch bis zum Ende durch.

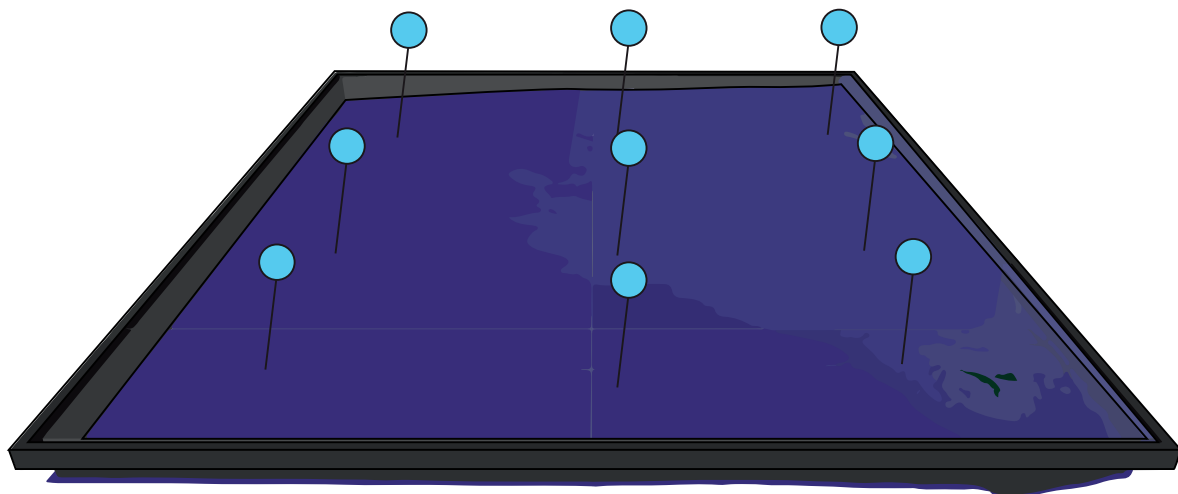


Abbildung 4.29: Im Hauptversuch gewählte Positionen der Dialogkonditionen auf der stereoskopischen Seekarte

4.3.3 Versuchsdesign

Versuchsreihe B erfolgte als faktorielles Design mit Messwiederholung und war in drei Phasen untergliedert. Untersucht wurden Innersubjektfaktoren. Der Aufbau der Studie ist in Abbildung 4.31 dargestellt. Die Hauptaufgabe bestand aus den 3x2 Faktorstufen für die Interaktion mit dem „Pie Menu“, welches Pseudo-zufällig an neun möglichen Stellen der stereoskopischen Seekarte erschien. Die möglichen pseudozufälligen Positionen sind in Abbildung 4.29 dargestellt. Die Hauptaufgabe war in sechs Blöcke unterteilt. In jedem Block wurde jede Kondition fünf Mal wiederholt, wodurch sich eine Gesamtmenge an 30 Trials pro Block ergab was der Ausführung von 180 Trials im Hauptversuch entspricht.

Bevor mit der Hauptversuchsaufgabe begonnen wurde, erfolgte eine schriftlich verlesene Erklärung der Teil- und Gesamtaufgaben für den Hauptversuch. Die Erklärung beinhaltete neben der Szenarien- und Aufgabenbeschreibung eine Erklärung jeder der sechs im Versuch eingesetzten Konditionen zur Interaktion mit dem „Pie Menu“. Der Versuchsteilnehmer durfte die Kondition nach der verlesenen Beschreibung direkt in der stereoskopischen Umgebung testen. Gleichzeitig wurden dem Nutzer laminierte Karten gezeigt, auf denen die Ausführung der Kondition symbolhaft abgebildet war. Die Abbildungen auf den Karten sind in Kapitel 4.3.5 dargestellt. Die Bedienung

jeder einzelnen Dialogkondition konnte vom Versuchsteilnehmer so einmal nach Anweisung durchgeführt werden. Hierbei wurden noch keine Daten aufgezeichnet.

Fehlausführungen wurden während Ausführung der Hauptaufgabe ein- und zweistufig per Beobachtung durch den Versuchsleiter erfasst. Die Reihenfolge der sechs Konditionen wurde pro Versuchsteilnehmer in einer zufälligen Reihenfolge neu erzeugt, um Lerneffekten unter den Konditionen entgegenzuwirken. Um die physische und mentale Beanspruchung der Versuchsperson während der Ausführung zu quantifizieren, wurden subjektive Daten über den NASA TLX Fragebogen pro Kondition erfasst und über den gesamten Versuch Muskelspannungen über Elektromyographie gemessen. Um Ermüdungserscheinungen des Hand-Arm-Apparates bedingt durch die Versuchslaufzeit vorzubeugen, wurde der Proband aufgefordert, nach jeder Bewegungsausführung die Hand aus dem Sichtvolumen zu entfernen und auf die Tischoberfläche zu legen. Damit die Bewegungsbahn der Hand gleichartig erfolgt, war die Ablegeposition der Hand durch die gezeichnete Silhouette einer Hand auf dem Tisch rechts vom Probanden vorgegeben (vgl. Foto vom Versuchsaufbau in Abbildung 4.22). Dem Versuchsleiter lag zum Zeitpunkt der Durchführung des Hauptversuches auf einem zweiten Display eine Übersicht über den Versuchsstand vor, diese ist in Abbildung 4.30 dargestellt. Die in der Prephase erhobenen Daten aus der Motorischen Leistungsserie des Wiener Testsystems sowie der Würfeltest von Gittler dienen neben der Validierung der Stichprobe in der anschließenden Auswertung auch für einen Vergleich der Performanz bei der Ausführung der Interaktion mit dem „Pie Menu“.

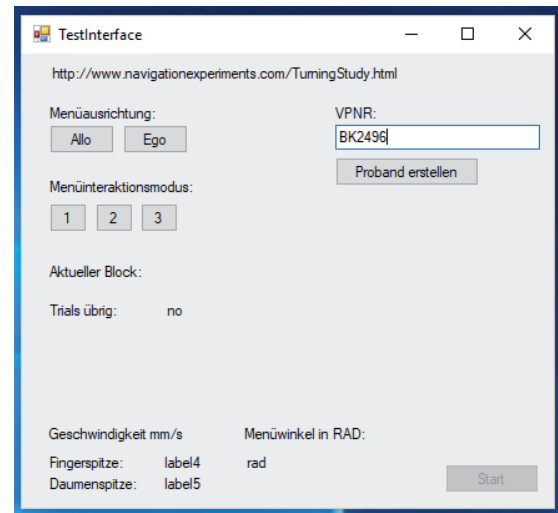


Abbildung 4.30: Versuchsleiterinterface in Versuchsreihe B

4.3.4 Versuchsdurchführung

Nach einer kurzen Begrüßung durch den Versuchsleiter wurde dem Versuchsteilnehmer eine kurze Beschreibung des Versuchs und des Ablaufes verlesen. Anschließend

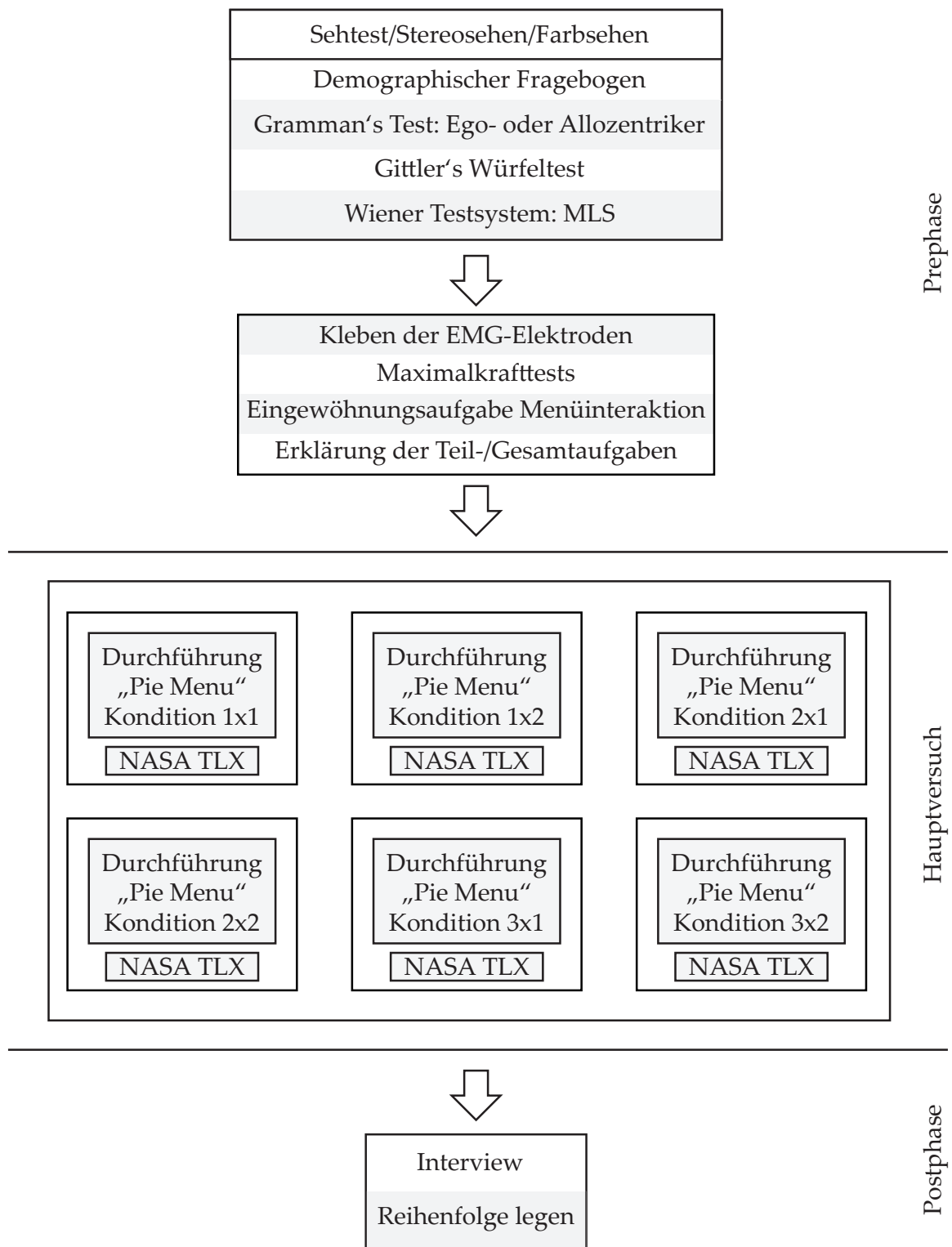


Abbildung 4.31: Darstellung des Ablaufplans von Versuchsreihe B

unterzeichneten die Versuchsteilnehmer eine schriftliche Einverständniserklärung und ihre demographischen Daten wurden erfasst. Zusätzlich wurden mögliche Erfahrungen mit dreidimensionalen Eingabesystemen sowie Erfahrung mit dem Eingabegerät „Leap Motion“ abgefragt. Nachfolgend wurden die Versuchsteilnehmer an einen Bildschirmarbeitsplatz gebeten, an dem sie den „Tunnel Task“ nach Gramann durchführten, um eine Klassifizierung der Versuchsteilnehmer in die strategischen Gruppen „Egozentriker“ und „Allozentriker“ vorzunehmen. Es folgte ein Sehtest, in dem Visus, Farbsehen und stereoskopisches Sehen der Versuchsteilnehmer validiert wurde. Anschließend wurde der Motoriktest aus der Motorischen Leistungsserie des Wiener Testsystems an einem Nebentisch durchgeführt. Hier wurden die drei Fleishman-Faktoren Fleishman-Faktoren „Unruhe“, „Präzision“ und „Geschwindigkeit“ erfasst. Nach Abschluss der Motorischen Leistungsserie führten die Versuchsteilnehmer den dreidimensionalen Würfeltest nach Gittler (1990) durch. Der nun folgende Tunneltask nach Gramann et al. (2010) wurde vor Beginn des Hauptversuches durchgeführt. Für den Hauptversuch nahmen die Probanden auf einem höhenverstellbaren Hocker vor dem stereoskopischen Display Platz und wurden in das stereoskopische System eingemessen. Dazu wurde beachtet, dass durch die Sitzhöhe ein orthogonaler Sehwinkel auf das stereoskopische Display gewährleistet ist. Bei der Versuchsdurchführung wurde beachtet, dass für jede Versuchsdurchführung einheitliche Lichtverhältnisse herrschen und die Umgebungshelligkeit bei vier Lux liegt. Der Sehabstand zum Display betrug zu Beginn des Versuches 75 cm. Die Probanden wurden zu Beginn des Versuches darauf hingewiesen, den Sehabstand zum Display nicht zu verändern. Während der Durchführung des Versuches wurde dieser Hinweis von der Versuchsleitung wiederholt. Vor Betrachtung der stereoskopischen Versuchsumgebung Probanden eine Kunststoffbrille mit polarisierten Lichtfiltern auf. Probanden, die als Sehhilfe eine Brille trugen, wurden mit einem entsprechenden Clip ausgestattet, der sich an der Brille per Klemme applizieren ließ.

4.3.5 Versuchshauptaufgabe

Das Ziel der Versuchshauptaufgabe bestand darin, anhand der vorhandenen Dialoginteraktion die Symbolfarbe eines Objektes in der interaktiven Seekarte zu verändern. Die Versuchspersonen wurden dabei aufgefordert, ein Objekt auf der stereoskopischen Seekarte zu reklassifizieren. Diese Reklassifizierung musste über die „Pie

Menu“-Struktur mit einer der sechs Konditionen vorgenommen werden, welche nach den 3x2 Faktorstufen definiert sind und miteinander verglichen werden. Der Ablauf der Reklassifizierung war stets der gleiche: Auf der stereoskopischen Seekarte wurde ein standardisiertes Symbol zur Klassifizierung eines Kontaktes gezeigt, welches nun in seiner Klassifizierung verändert werden sollte. Der Versuchsteilnehmer hatte dazu die Aufgabe, die Farbe des Symbols über den Interaktionsdialog anzupassen. Welche Farbe ausgewählt werden sollte, wurden unten Rechts in der Stereoskopischen Seekarte als vorgegebenes Symbol angezeigt. Die Instruktionen wurden dem Versuchsteilnehmer zu Beginn des Versuches vorgelesen.

4.3.6 Unabhängige Variablen

Als unabhängige Variablen werden die drei verschiedenen Stufen der Dialoginteraktion in der stereoskopischen Desktopumgebung definiert, die es gilt, mit dem gestreckten Zeigefinger zu bedienen, „Quick Intersection“, „Slow Intersection“ und „Swipe Out“. Die drei Faktorstufen werden mit den Faktorstufen „egozentrisch“ und „allozentrisch“ des Faktors „Ausrichtung“ multipliziert. Die Zeigefingerspitze bildet die interaktive Stelle des Handmodells, die auf Kollisionen mit anderen interaktiven Elementen in der virtuellen Umgebung reagiert und somit auch der Auslösung der Interaktionsdialoge dient.

4.3.7 Abhängige Variablen

Als abhängige Variablen werden Performanzwerte während der Ausführung der Interaktionsaufgabe erfasst. Dazu gehören die durchschnittlich gemessene Dauer der Ausführung in Millisekunden, die Fehlerrate und die anschließende subjektive Bewertung der Reihenfolge. Zeit und Fehlerrate werden objektiv über das System erfasst. Der Zeitwert wird in Millisekunden gemessen. Die Messung beginnt mit der Anzeige des Interaktionsdialoges am Objekt, welches nach der Versuchshauptaufgabe umklassifiziert werden soll und endet mit dessen erfolgreicher Umklassifizierung. Fehlende Auslösungen, falls der Interaktionsdialog nicht getroffen wurde, oder die Bewegung der Zeigefingerspitze unter dem Schwellwert lag, wurden ebenfalls erfasst. Die vom Versuchsteilnehmer präferierte Reihenfolge der 3x2 Faktorstufen wurde ebenfalls als abhängige Variable erfasst. Es werden desweiteren subjektive Leistungs- und

Performanzdaten über den NASA TLX Fragebogen (Hart & Staveland, 1988) ohne anschließenden Paarvergleich erhoben. Die Dimensionen „Geistige Anforderung“, „Körperliche Anforderung“, „Zeitliche Anforderung“, „Leistung“, „Anstrengung“ und „Frustration“. Um nicht nur subjektive Leistungs- und Anstrengungsmessungen über den NASA TLX zu erhalten, werden weitere Belastungsdaten mittels Oberflächen-Elektromyographie an folgenden Muskeln aufgezeichnet und als abhängige Variablen verwendet: „Interosseus“, „Flexor Carpi Ulnaris“, „Brachioradialis“, „Deltoides pars acromialis“ und der „Trapezius pars descendens“. Die im Pre-Test erfasste Strategie zur räumlichen Orientierung in virtuellen Umgebungen, welche im Pre-Test über den Tunneltask von Gramann et al. (2005a) erfasst wurde, wird ebenfalls als abhängige Variable verwendet. Die Strategie wird nach Gramann, Müller, Schönebeck und Debus (2006) in die Strategiegruppen „Allozentrisch“, „Egozentrisch“ eingeteilt. Versuchsteilnehmer, welche nach dem Tunneltask keine bestimmte Strategie zur Orientierung bevorzugen, bilden eine dritte, als „Gemischt“ bezeichnete Gruppe.

4.3.8 Hypothesen

Ziel der zweiten Versuchsreihe ist die Untersuchung der Gesamtperformanz und der Ergonomie der drei Interaktionsformen und der Einfluss einer egozentrischen oder allozentrischen Ausrichtung des „Pie Menu“-förmigen Interaktionsdialoges. Die Trajektorien, welche mit der Zeigefingerspitze für die Auslösung der Konditionen „Slow Intersection“ und „Quick Intersection“ mit der Zeigefingerspitze zur Auslösung des Interaktionsdialoges geführt werden müssen, zeigen jeweils in die Tiefe des Displayvolumens. Zur Auslösung der Kondition „Swipe Out“ muss die Trajektorie der Zeigefingerspitze parallel zur Sichtebeine geführt werden. Da Kondition „Quick Intersection“ von der Kondition „Slow Intersection“ sich in Bezug auf die Trajektorie ähnlich sind, und nur unterschiedliche Geschwindigkeiten der Zeigefingerspitze als Schwellwert zur Auslösung des Interaktionsdialoges definiert sind, werden diese beiden Konditionen gesondert miteinander verglichen. Ein Vergleich aller Konditionen untereinander wird ebenfalls durchgeführt.

Performanz

Die Performanz wurde durch die Erfassung der Ausführungszeit in Millisekunden und über die Fehlerrate objektiv und über den NASA TLX Fragebogen subjektiv

erfasst. Die „Zeitliche Anforderung“ im NASA TLX befragt den Versuchsteilnehmer explizit nach der Abfolge der Aufgabe, ob diese langsam und geruhsam oder schnell und hektisch war. Da die Wegstrecke des Zeigefingers bei Ausführung der unterschiedlichen Konditionen unterschiedlich sein kann, ist auch ein Vergleich der gemessenen „Zeit“ die zur Auslösung des Interaktionsdialoges benötigt wurde relevant und wird im folgenden als abhängige Variable „Auslösungszeit“ bezeichnet. Es werden die folgenden Hypothesen abgeleitet.

- H₁: Es tritt kein Effekt für die „Auslösungszeit“ der Interaktionsdialoge „Slow Intersection“, „Quick Intersection“ und „Swipe Out“ mit den Ausrichtungen „egozentrisch“ und „allozentrisch“ auf.
- H₂: Es tritt bei Ausführung der Versuchsaufgabe mit den Konditionen „Slow Intersection“, „Quick Intersection“ und „Swipe Out“ mit den Ausrichtungen „egozentrisch“ und „allozentrisch“ keine erhöhte Fehlerrate auf.
 - H₃: Die Fehlerrate für die Ausrichtung „egozentrisch“ ist nicht höher als für die Ausrichtung „allozentrisch“.
 - H₄: Es tritt kein Unterschied für die subjektiv wahrgenommene „Zeitliche Anforderung“ im NASA TLX für die Konditionen „Slow Intersection“, „Quick Intersection“ und „Swipe Out“ mit den Ausrichtungen „egozentrisch“ und „allozentrisch“ auf.
 - H₅: Die Kondition „Slow Intersection“ weist keine niedrigere Auslösungszeit auf, als die Kondition „Quick Intersection“.
 - H₆: Die Kondition „Swipe Out“ weist keine höhere Auslösungszeit auf, als die Konditionen „Quick Intersection“ und „Slow Intersection“.

Geistige Beanspruchung

Die Messung der geistigen Beanspruchung wird über die subjektiven Messdaten des NASA TLX Fragebogens durchgeführt. Im Bezug auf die untersuchten Konditionen wird als Nullhypothese formuliert, dass keine signifikanten Unterschiede in den Konditionen des NASA TLX auftreten. Dazu werden die Dimensionen „Geistige Anforderungen“, „Frustration“ und „Leistung“ für die geistige Beanspruchung bei

der Aufstellung der Hypothesen berücksichtigt. Die geistige Anforderung fragt ab, als wie stark die subjektive Anstrengung bei Ausführung der jeweiligen Versuchskondition des Teilnehmers wahrgenommen wurde. Der Versuchsteilnehmer soll entscheiden, ob die Aufgabe leicht oder anspruchsvoll, einfach oder komplex oder eine hohe Genauigkeit erforderte, oder etwa fehlertolerant war.

- H₇: Es tritt kein Unterschied in der subjektiven „Geistigen Anforderung“ im NASA TLX bei Ausführung der Konditionen „Slow Intersection“, „Quick Intersection“ und „Swipe Out“ mit den Ausrichtungsfaktoren „egozentrisch“ und „allozentrisch“ auftritt.
- H₈: Es tritt kein Unterschied in der subjektiven Empfindung der „Leistung“ im NASA TLX bei Ausführung der Konditionen „Slow Intersection“, „Quick Intersection“ und „Swipe Out“ mit den Ausrichtungsfaktoren „egozentrisch“ und „allozentrisch“ auf.

Die Bewertung der Frustration bei Ausführung der verschiedenen Konditionen misst, wie unsicher, gestresst und verärgert die Versuchsteilnehmer bei der jeweiligen Ausführung waren. Es wird die Annahme getroffen, dass durch die verschiedenen Auslösungszeiten von Kondition „Slow Intersection“ zu „Quick Intersection“ beispielsweise Ungeduld bei den Versuchsteilnehmer auftritt, was zu einer schlechteren Bewertung des Faktors „Frustration“ führen kann. Es wird die folgende Hypothese abgeleitet:

- H₉: Bei Ausführung der Konditionen „Slow Intersection“, „Quick Intersection“ und „Swipe Out“ mit den Ausrichtungsfaktoren „egozentrisch“ und „allozentrisch“ tritt keine subjektiv empfundene Frustration auf.
- H₁₀: Die „egozentrische“ Dialogdarstellung erzeugt eine geringere subjektive „Geistige Beanspruchung“ bei der Ausführung.
- H₁₁: Bei Ausführung der Konditionen „Slow Intersection“, „Quick Intersection“ und „Swipe Out“ mit den Ausrichtungsfaktoren „egozentrisch“ und „allozentrisch“ tritt keine subjektive Anstrengung auf.

Körperliche Belastung und Beanspruchung

Die körperliche Beanspruchung wurde als subjektiver Wert über den NASA TLX und über die Messung der normierten Muskelaktivität über Elektromyographie erfasst. Hierzu wurden Messungen an der Hand-Arm-Muskulatur vorgenommen. Die über Oberflächenelektromyographie erfassten Werte wurden über vor dem Hauptversuch durchgeführte Maximalkrafttests, oder „MVC-Tests“ auf davon abhängige Prozentwerte normiert. Diese Prozentwerte werden als Basis für die Auswertung der Muskelaktivität und muskulären Belastung der einzelnen Konditionen als objektive Messwerte verwendet. Für die Bewertung der körperlichen Belastung und Beanspruchung werden die folgenden Hypothesen abgeleitet.

- H₁₂: Es treten bei Ausführung der Konditionen „Slow Intersection“, „Quick Intersection“ und „Swipe Out“ mit den Ausrichtungen „egozentrisch“ und „allozentrisch“ keine Unterschiede der subjektiven „körperlichen Anforderungen“ auf.
- H₁₃: Es treten keine Unterschiede in der muskulären Beanspruchung des Muskels „Interosseus“ über die Konditionen „Slow Intersection“, „Quick Intersection“ und „Swipe Out“ mit den Ausrichtungen „egozentrisch“ und „allozentrisch“ auf.
- H₁₄: Es treten keine Unterschiede in der muskulären Beanspruchung des Muskels „Flexor Carpi Ulnaris“ über die Konditionen „Slow Intersection“, „Quick Intersection“ und „Swipe Out“ mit den Ausrichtungen „egozentrisch“ und „allozentrisch“ auf.
- H₁₅: Es treten keine Unterschiede in der muskulären Beanspruchung des Muskels „Brachioradialis“ über die Konditionen „Slow Intersection“, „Quick Intersection“ und „Swipe Out“ mit den Ausrichtungen „egozentrisch“ und „allozentrisch“ auf.
- H₁₆: Es treten keine Unterschiede in der muskulären Beanspruchung des Muskels „Deultoides“ über die Konditionen „Slow Intersection“, „Quick Intersection“ und „Swipe Out“ mit den Ausrichtungen „egozentrisch“ und „allozentrisch“ auf.

- H₁₇: Es treten keine Unterschiede in der muskulären Beanspruchung des Muskels „Trapezius pars Descendenz“ über die Konditionen „Slow Intersection“, „Quick Intersection“ und „Swipe Out“ mit den Ausrichtungen „egozentrisch“ und „allozentrisch“ auf.
- H₁₈: Es wird erwartet, dass es keine Unterschiede in der muskulären Beanspruchung für den Faktor „Auslösung“ gibt.
- H₁₉: Es wird erwartet, dass es keine Unterschiede in der muskulären Beanspruchung für den Faktor „Ausrichtung“ gibt.
- H₂₀: Die Kondition „Slow Intersection“ verursacht keine höhere muskuläre Beanspruchung für den Schulterbereich, als die Kondition „Quick Intersection“.
- H₂₁: Die Kondition „Slow Intersection“ verursacht keine höhere muskuläre Beanspruchung für den Schulterbereich, als die Kondition „Swipe Out“.
- H₂₂: Es gibt keinen Unterschied der muskulären Belastung für die Hand-Unterarm-Muskulatur für den Faktor „Auslösung“.
- H₂₃: Es gibt keinen Unterschied der muskulären Belastung für die Hand-Unterarm-Muskulatur für den Faktor „Ausrichtung“.

4.3.9 Ergebnisse der Pre- und Posttests

Die Beschreibung der Stichprobe hinsichtlich kognitiver sowie motorischer Fähigkeiten erfolgt mittels der vor dem Versuch durchgeführten Vortests. Neben diesen Fähigkeiten werden die Versuchsteilnehmer auch auf die von ihnen verwendete Strategie zur Lösung von Navigationsaufgaben untersucht. Im folgenden werden die dazu verwendeten Tests ausgewertet. Die papierbasierten Fragebögen können dem Anhang dieser Schrift entnommen werden.

Wiener Testsystem

Wie in Versuchsreihe A 4.2 wurde das Wiener Testsystem der Firma Schuhfried (Schuhfried, 2009) verwendet, um die motorische Leistungsfähigkeit der Versuchsteilnehmer zu validieren. Für die Testreihe wurde die rechte Hand unter Berücksichtigung der Fleishman-Faktoren „Unruhe“, „Präzision“ und „Geschwindigkeit“,

Tabelle 4.7: Deskriptive Statistik der Fleishman-Faktoren (n=43)

T-Wert	Mittelwert	Standardabweichung
Unruhe	51,93	6,70
Präzision	50,77	6,90
Geschwindigkeit	48,33	7,35

Tabelle 4.8: Deskriptive Statistik der Würfeltest-Ergebnisse (n=43)

	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung
Würfel Richtig	0	17	10,14	4,71
Würfel Falsch	0	16	5,65	4,50
Nicht bearbeitet	0	8	1,19	1,89

ähnlich der Vorgehensweise in Versuchsreihe A, untersucht. Die T-Werte wurden nach Fleishman entsprechend berechnet (Schuhfried, 2009). Die erreichten T-Werte für die Gesamtstichprobe von n=43 sind in Tabelle 4.7 angegeben. Demnach erreicht die Stichprobe im Mittel einen überdurchschnittlichen Wert im Vergleich zur Normstichprobe der Motorischen Leistungsserie.

Würfeltest und Bildungsgrad

Der Würfeltest nach Gittler (1990) wurde für die Validierung des räumlichen Vorstellungsvermögens der Stichprobe verwendet. Erfasst wurde die Anzahl richtiger, falscher und nicht bearbeiteter Würfelaufgaben. Die deskriptiven Ergebnisse für die Stichprobe n=43 sind in Tabelle 4.8 dargestellt. Die Ergebnisse des Würfeltests weichen stark voneinander ab. Die Aufteilung des Bildungsgrades innerhalb der Stichprobe lag bei 2,3% Teilnehmer mit mindestens mittlerer Reife, 67,4% Teilnehmer mit mindestens Abitur, und 30,2 % Teilnehmer mit einem Hochschulabschluss.

Strategie Ego- und Allozentriker

Die Strategie der Versuchsteilnehmer bei der Navigation in virtuellen Umgebungen wurde nach Gramann, Müller, Eick und Schönebeck (2005b) bestimmt. Bei einer Stichprobengröße von n=43 wurden elf Versuchsteilnehmer einer egozentrischen

Strategie zugeordnet, 17 Versuchsteilnehmer lösten die Navigationsaufgabe mit einer allozentrischen Strategie und 15 Versuchsteilnehmer konnten keiner bestimmten Strategie zugeordnet werden.

4.3.10 Ergebnisse des Hauptversuches B

Im folgenden Abschnitt werden die Hypothesen zu Versuchsreihe B ausgewertet. Die verschiedenen Auslösmethoden „Quick Intersection“, „Slow Intersection“ und „Swipe Out“ werden hinsichtlich ihrer Performanz, der geistigen Beanspruchung und körperlichen Beanspruchung bei der Interaktion untersucht. Anschließend werden die gemessenen Ergebnisse zusammengefasst.

Performanz

Für die Performanz werden die Faktoren Ausrichtung und die drei Konditionen zuerst auf einen Effekt hinsichtlich der Ausführungszeit der Aufgabe untersucht. Hierzu sind in Tabelle 4.9 die deskriptiven Werte für die durchschnittliche Zeit der Aufgabenausführung in Millisekunden für alle Konditionen mit den Faktoren „allozentrisch“ und „egozentrisch“ dargestellt. Bei den Zeiten sind Abweichungen zwischen den Konditionen und deren Ausrichtung zu beobachten. Die Kondition „Quick Intersection“ zeigt deskriptiv höhere Zeitwerte als die Kondition „Slow Intersection“, die Standardabweichung für die Kondition „Slow Intersection“ ist geringer als für die Konditionen „Quick Intersection“ und „Swipe Out“. Um nun herauszufinden, ob ein Effekt der 3x2 Innersubjektfaktoren vorliegt, werden die Voraussetzungen für eine Varianzanalyse geprüft, um diese anschließend berechnen zu können. Die Zeitmesswerte in Millisekunden und die Fehlerrate sind dazu relevant. Deskriptiv können bereits Unterschiede zwischen den einzelnen Konditionen festgestellt werden. Zunächst werden die Daten auf Normalverteilung überprüft. Gemäß eines Shapiro-Wilk-Tests waren die Daten für die Auslösungszeit nicht normalverteilt ($p < 0,035$). Da die Stichprobengröße jedoch $n = 43$ beträgt, wird die Varianzanalyse dennoch durchgeführt. Ein Mauchly-Test auf Sphärizität der Daten für den Faktor „Auslösung“ ergab einen Wert von $p < 0,001$ für den, daher wurde ein Greenhouse-Geisser-Korrekturverfahren angewendet. Es gab einen signifikanten Effekt für den Faktor „Auslösung“ mit $F(1,422, 59,718) = 121,82, p < 0,001$. Es tritt damit ein Effekt für die „Auslösungszeit“ der drei Auslösmethoden auf und die Nullhypothese

Tabelle 4.9: Deskriptive Statistik Zeit von Aufgabe bis Auslösung der Dialogkondition(n=42)

Kondition	Mittelwert (ms)	Standardabw. (ms)
Alloz. Quick	2441,860	931,959
Egoz. Quick	2882,947	1018,473
Alloz. Slow	1746,020	478,685
Egoz. Slow	1835,380	518,456
Alloz. Swipe	1063,316	421,642
Egoz. Swipe	1024,060	291,544

H_1 für die Faktorstufe „Auslösung“ wird verworfen. Für den Faktor „Ausrichtung“ tritt ebenfalls ein signifikanter Effekt für die Auslösungszeit mit $F(1, 42) = 12,496$; $p = 0,001$; partielles $\eta^2 = 0,229$. Post-hoc Tests mit Bonferroni-Korrektur für den Faktor „Auslösung“ ergaben, dass für den Faktor „Auslösung“ die Faktorstufen „Quick Intersection“ signifikante Unterschiede ($p < 0,001$) im Vergleich mit „Slow Intersection“ auftraten (859,442; 95%-CI[584,361; 1134,522]). Der Vergleich der Faktorstufen „Quick Intersection“ mit „Swipe Out“ war ebenfalls signifikant ($p < 0,001$) mit (1594,252; 95%-CI[1287,077; 1901,427]). Der Vergleich der Faktorstufen „Auslösung“ für die Auslösungszeit ist in Abbildung 4.32 dargestellt, der Faktor „Ausrichtung“ ist in Abbildung 4.33 dargestellt.

Ein Post-hoc durchgeführter Paarweiser Vergleich mit Bonferroni-Korrektur ergab jeweils signifikante Unterschiede im Vergleich zwischen den Konditionen „Quick“ zu „Slow“ ($p < 0,001$) (871,703; 95%-CI[591,455; 1151,952]). Die Nullhypothese H_5 wird damit verworfen. Weiter ergab sich ein signifikanter Unterschied im Vergleich zwischen den Konditionen „Quick“ zu „Swipe Out“ ($p < 0,001$) (1618,715; 95%-CI[1310,090; 1927,340]) und ein signifikanter Unterschied zwischen den Konditionen „Slow“ zu „Swipe Out“ ($p < 0,001$) (747,012; 95%-CI[588,013; 906,010]). Die Nullhypothese H_6 wird damit angenommen. Eine Übersicht der Analyse ist in Abbildung 4.32 dargestellt. Die Auswertung der Varianzanalyse für den Faktor „Ausrichtung“ war ebenfalls signifikant für die Zeitmessung mit $F(1; 41) = 11,052$ mit $p < 0,05$, partielles $\eta^2 = 0,212$ (vgl. Abbildung 4.33).

Die deskriptive Analyse der Fehlerrate zeigt erhöhte Werte für die Kondition „Swipe Out“. Um Hypothese H_2 auf statistische Signifikanz zu überprüfen, werden die

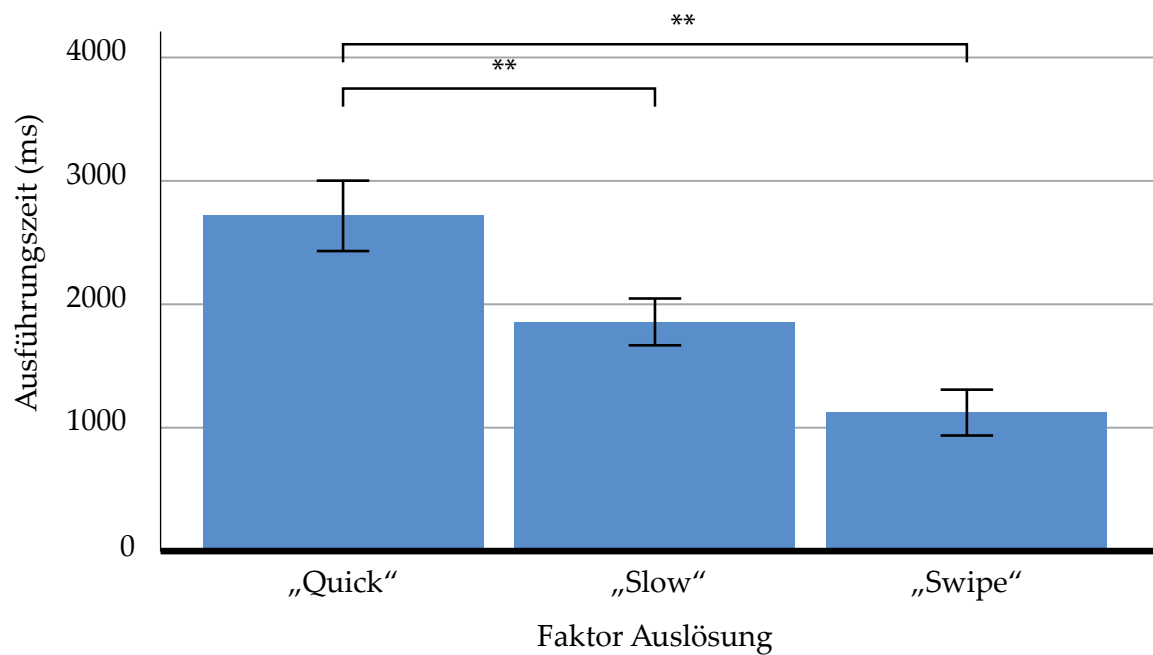


Abbildung 4.32: Boxplots mit 95%-CI der Ausführungszeit für die Faktorstufen „Quick Intersection“, „Slow Intersection“ und „Swipe Out“ des Faktors „Auslösung“

Tabelle 4.10: Deskriptive statistische Auswertung für die Fehlerrate der Versuchshauptaufgabe für Faktor „Auslösung“ x „Ausrichtung“

Kondition x Faktor	Mittelwert	Standardabweichung
„Allo“ und „Quick“	1,07	1,316
„Ego“ und „Quick“	1,49	1,609
„Allo“ und „Slow“	0,88	1,138
„Ego“ und „Slow“	0,56	0,700
„Allo“ und „Swipe“	2,81	2,228
„Ego“ und „Swipe“	2,33	1,541

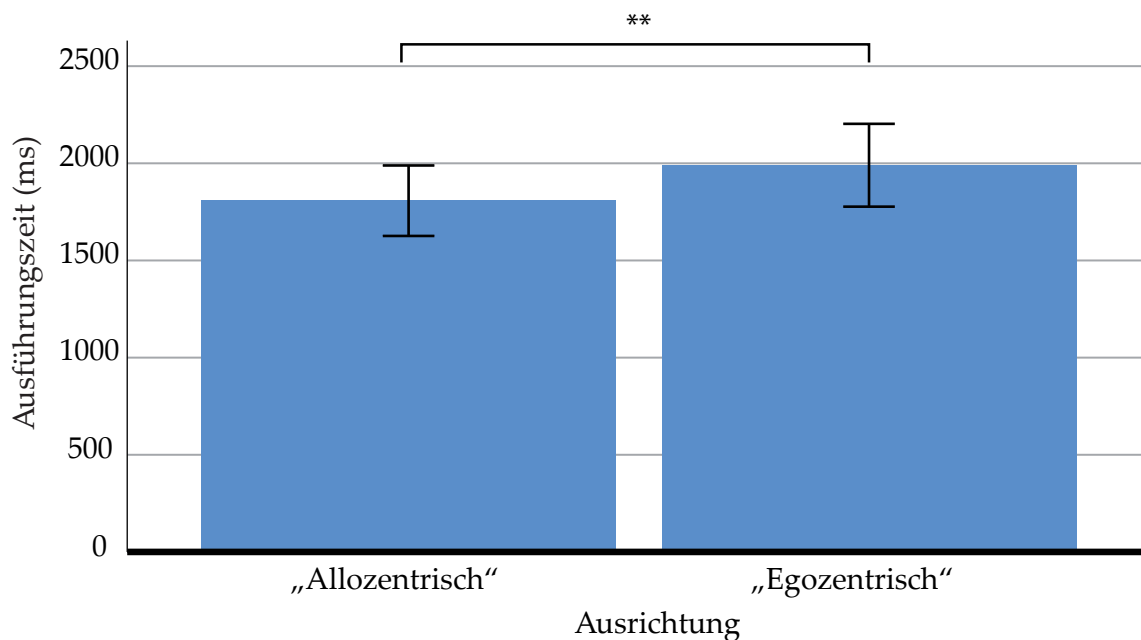


Abbildung 4.33: Boxplots mit 95%-CI der Ausführungszeit für die Faktorstufen „Allozentrisch“ und „Egozentrisch“ des Faktors „Ausrichtung“

Voraussetzungen für eine Varianzanalyse geprüft. Nach einem Shapiro-Wilk Test liegt eine Verletzung der Normalverteilung der Daten mit ($p < 0,014$) vor. Es wird aufgrund der Stichprobengröße von $n = 43$ eine Varianzanalyse mit Messwiederholung durchgeführt. Zuvor werden die Daten mittels Mauchly-Test auf Sphärizität überprüft. Da eine Verletzung der Sphärizität vorliegt ($p < 0,001$) wird eine Greenhouse-Geisser-Korrektur bei der Berechnung der Varianzanalyse vorgenommen. Hierbei konnte ein signifikanter Effekt für den Faktor „Auslösung“ mit $F(1,422, 60,348) = 30,977$, $p < 0,001$ auf die gemessene Fehlerrate nachgewiesen werden. Die Nullhypothese H_2 wird verworfen.

Ein Vergleich der drei verschiedenen Auslösungsmethoden unter Einbeziehung der Ausrichtung ist in Abbildung 4.36 dargestellt. Die Fehlerrate ist für die Auslösungsmethode „Slow“ am geringsten und weist dazu die geringste Standardabweichung der gemessenen Fehlerrate auf ($M = 0,738$; $SD = 0,121$). Die Fehlerrate für die Kondition „Quick“ ($M = 1,310$; $SD = 0,177$) lag über der Fehlerrate der Kondition „Swipe Out“, welche unter den drei Auslösungsmethoden die höchste Fehlerrate aufwies ($M = 2,583$; $SD = 0,246$).

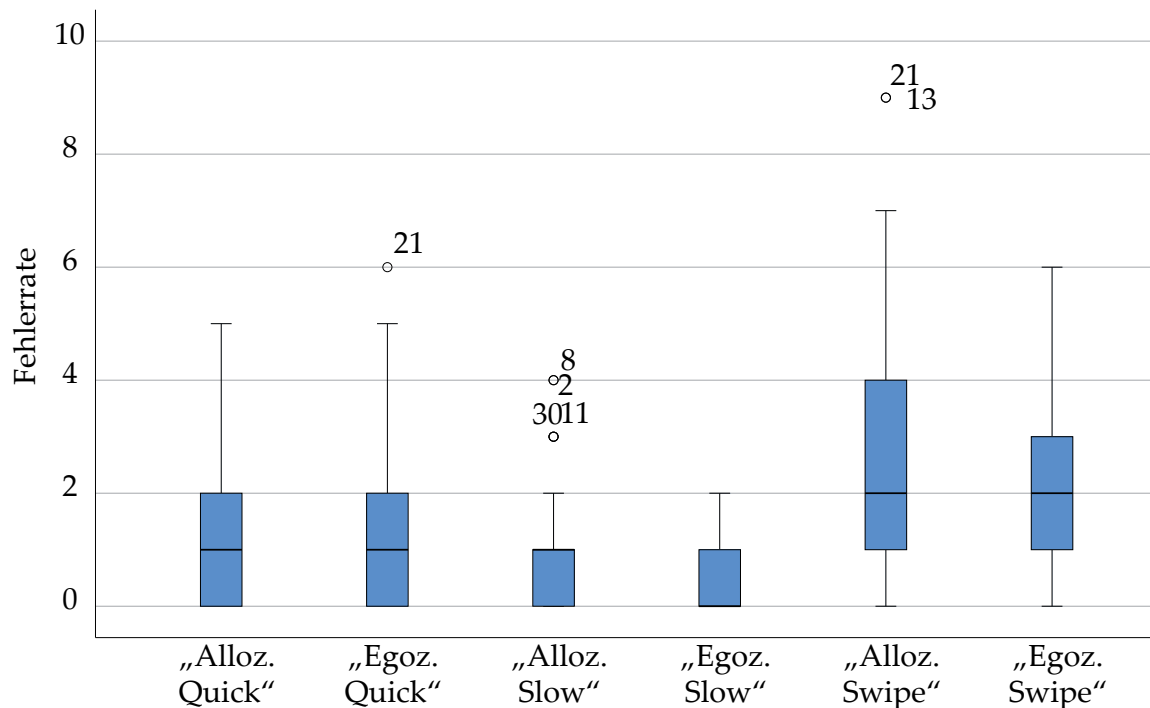


Abbildung 4.34: Boxplots mit 95%-CI für die Fehlerrate mit Darstellung der Ausreißer

Abbildung 4.34 zeigt die Fehlerraten für die Einzelkonditionen, die sich aus dem kombinierten Faktoren ergeben. In der Abbildung sind ebenfalls die entstandenen Ausreißer dargestellt. Die Kondition „Allozentrisch“ x „Quick“ zeigt, dass leichte Ausreißer für vier Fälle vorliegen, die Kondition „Egozentrisch“ x „Quick“ weist dagegen keine Ausreißer auf. Da es sich bei allen Ausreißern nur um leichte Ausreißer handelt, verbleiben die erhobenen Daten in der Stichprobe. Die Konditionen „Slow“ sowie „Quick“ weisen für die Faktoren „Allozentrisch“ und „Egozentrisch“ jeweils ähnliche Fehlerraten mit ähnlichen Werten für Standardabweichungen auf. Diese Beobachtung kann für die Kondition „Swipe Out“ nicht abgeleitet werden, da die Fehlerrate und Standardabweichung für die Kondition „Egozentrisch“ x „Swipe Out“ geringer ist, als für die Kondition „Allozentrisch“ x „Swipe Out“. Ein Shapiro-Wilk Test auf die erhobenen Daten der Fehlerrate ergab, dass die Daten nicht normalverteilt sind ($p < 0,001$). Ein Bonferroni-korrigierter Post-hoc durchgeführter Paarweiser Vergleich der Konditionen „Quick“, „Slow“ und „Swipe Out“ zeigt, dass die Konditionen untereinander jeweils signifikant waren.

Um Hypothese H_3 zu überprüfen, werden die Fehlerraten der Ausrichtungen „Ego-

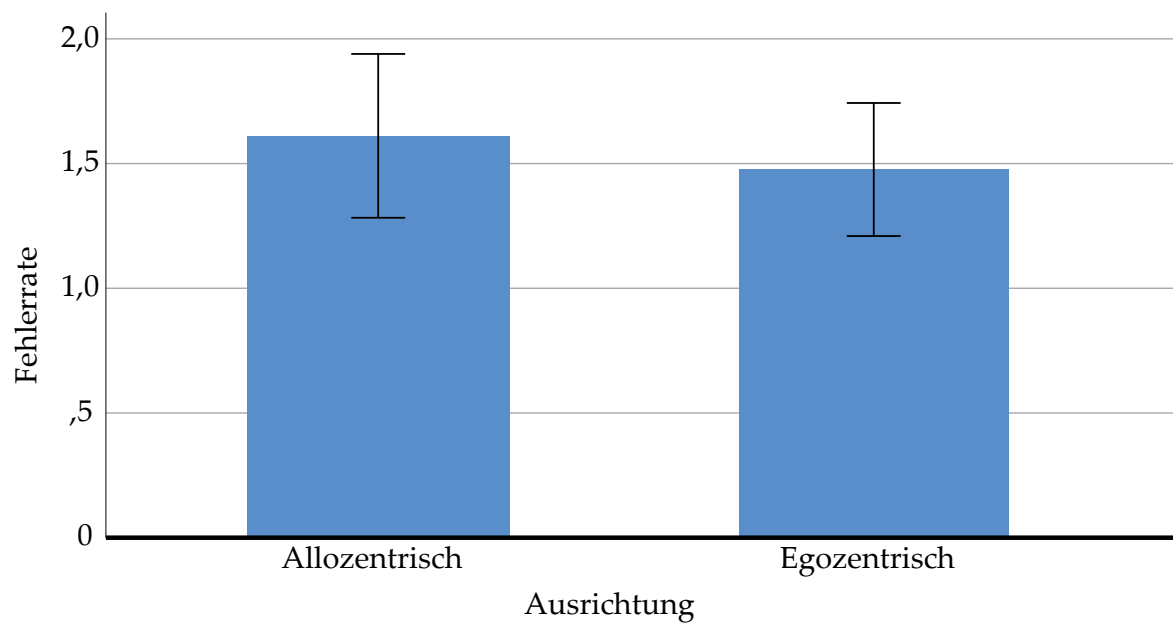


Abbildung 4.35: Boxplots mit 95%-CI der Fehlerrate für den Faktor „Ausrichtung“

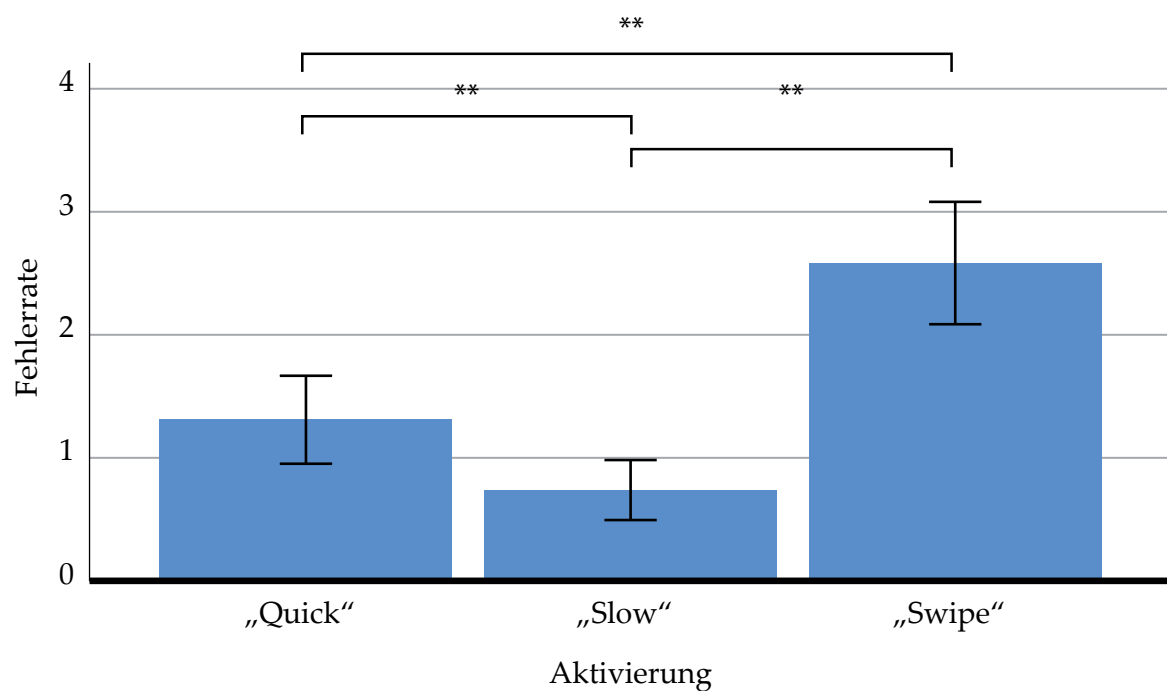


Abbildung 4.36: Boxplots mit 95%-CI der Fehlerrate für den Faktor „Auslösung“

Tabelle 4.11: Deskriptive Statistik NASA TLX Zeitliche Anforderung (n=42)

Kondition	Mittelwert	Standardabw.
Zeitl. Anford. Alloz. Quick	6,738	4,786
Zeitl. Anford. Egoz. Quick	7,179	4,751
Zeitl. Anford. Alloz. Slow	4,975	3,994
Zeitl. Anford. Egoz. Slow	4,833	3,679
Zeitl. Anford. Alloz. Swipe	4,476	3,313
Zeitl. Anford. Egoz. Swipe	4,929	3,705

zentrisch“ und „Allozentrisch“ miteinander verglichen. Tabelle 4.10 ist zu entnehmen, dass die Mittelwerte für die Fehlerrate uneinheitlich sind. Das gleiche gilt für die Standardabweichung. Die Fehlerrate für die Faktorstufe „Allozentrisch“ ($M = 1,61$) liegt im Mittel leicht über der Fehlerrate für den Faktor „Egozentrisch“ ($M = 1,48$). In einem paarweisen, Bonferroni-korrigierten Vergleich der beiden Faktoren wurde kein signifikanter Unterschied ($p = 0,373$) zwischen „egozentrischer“ und „allozentrischer“ Ausrichtung der Dialogstruktur festgestellt (0,14, 95%-CI[-0,17, 0,44]). Damit wird die Nullhypothese H_3 angenommen. Da die Normalverteilung als Voraussetzung für die Varianzanalyse bei der Analyse der Fehlerraten verletzt wurde, wurden die Daten nochmals mit einem Nicht-Parametrischen Verfahren zur Validierung der Effekte überprüft. Hierzu wurde der Friedman-Test verwendet. Dieser resultierte ebenfalls in einem signifikanten Effekt bei einem Vergleich der Einzelkonditionen ($\chi^2(5) = 63,862$; $p < 0,001$). Desweiteren sind in Abbildung 4.36 die Fehlerraten für den Faktor „Auslösung“ dargestellt. Alle Faktorstufen des Faktors „Auslösung“ waren untereinander signifikant. Da ein Mauchly-Test in einer Verletzung der Sphärizität resultierte, wurde eine Greenhouse-Geisser-Korrektur auf die Berechnung der Varianzanalyse angewendet $F(1,472; 60,348) = 30,977$; $p < 0,001$; partielles $\eta^2 = 0,430$. Ein paarweiser Post-hoc durchgeführter Vergleich zeigte, dass die Faktorstufe „Quick Intersection“ signifikante Unterschiede in der Fehlerrate ($p = 0,002$) zu „Slow Intersection“ (0,571 95%-CI[0,192; 0,951]) und signifikante Unterschiede in der Fehlerrate ($p < 0,001$) zu „Swipe Out“ aufwies (-1,274 95%-CI[-1,957; -0,590]), die Fehlerrate der Faktorstufe „Slow Intersection“ war zudem noch signifikant unterschiedlich ($p < 0,001$) zu Faktorstufe „Swipe Out“ (-1,845 95%-CI[-2,528; -1,163]).

Die subjektive Zeitwahrnehmung wurde über den NASA TLX Fragebogen erfasst.

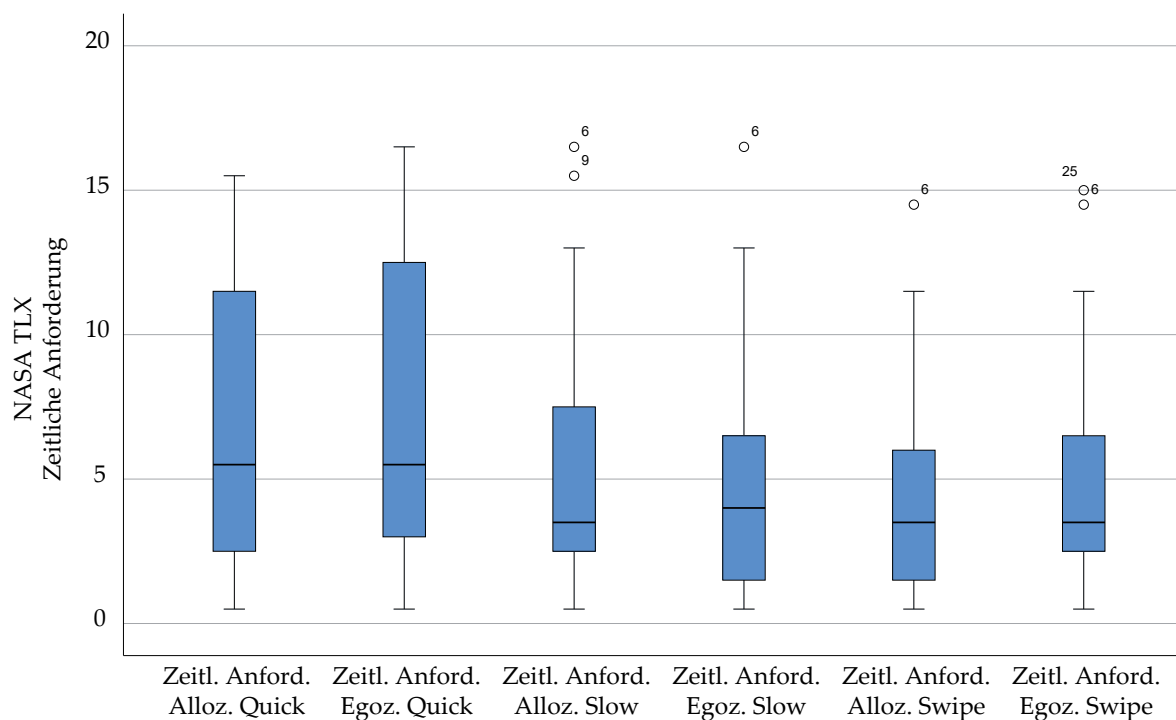


Abbildung 4.37: Boxplots mit 95%-CI für den Faktor „Ausrichtung“

Anhand der erfassten Daten kann nun überprüft werden, ob zeitliche Unterschiede bei Auslösung der verschiedenen Konditionen subjektiv wahrgenommen wurden. Für die Messung der Zeitlichen Anforderung mittels NASA TLX Fragebogen musste eine Versuchsperson aus der Datenreihe aufgrund fehlender elektromyographischer Messwerte entfernt werden, so dass die Datenanalyse mit $n = 42$ Versuchsteilnehmern durchgeführt wird. Die erhobenen Daten werden zunächst einer explorativen Datenanalyse unterzogen, welche in Abbildung 4.37 dargestellt ist. Es lässt sich ableiten, dass die Versuchsteilnehmer für die Konditionen „Allozentrisch“ $\times$ „Quick“ „Egozentrisch“ $\times$ „Quick“ subjektiv empfunden deutlich mehr Zeit benötigten, um eine Auslösung zu erzielen. Die entsprechenden Mittelwerte und Standardabweichungen sind in Tabelle 4.11 angegeben. Der subjektive Zeitwert für „Egozentrisch“ liegt etwas höher. Für die restlichen Konditionen sind Ausreißer zu verzeichnen. Da es sich um leichte Ausreißer handelt, werden die jeweiligen Versuchsteilnehmer in der Stichprobe belassen.

Eine Überprüfung auf Normalverteilung der Daten mittels Shapiro-Wilk-Test ergab, dass diese nicht normalverteilt sind ($p > 0,05$). Da die Stichprobengröße $n > 30$ umfasst, wird eine Varianzanalyse zur Überprüfung der Daten auf Signifikanz

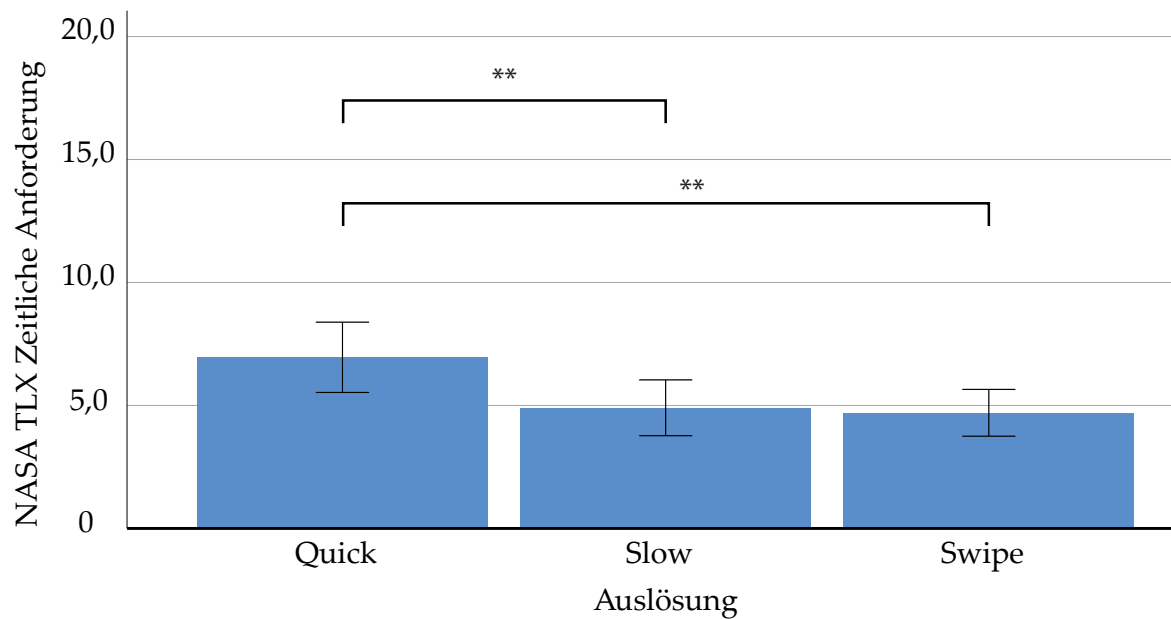


Abbildung 4.38: Boxplots mit 95%-CI für die Zeitliche Anforderung aus dem NASA TLX für den Faktor „Auslösung“

vorgenommen. Mauchly's Test ergab, dass für den Faktor „Auslösung“ eine Verletzung der Sphärizität vorliegt. Für die Analyse des Faktors „Auslösung“ wird das Greenhouse-Geisser-Korrekturverfahren zur Bestimmung der Effekte verwendet. Für den Faktor „Ausrichtung“ und „Ausrichtung“ x „Auslösung“ ist kein Korrekturverfahren notwendig. Der Faktor „Auslösung“ war signifikant mit $F(1,715; 70,324) = 13,027$ $p < 0,001$; partielles $\eta^2 = 0,241$. Die Faktoren „Ausrichtung“ und „Ausrichtung“ x „Auslösung“ waren dagegen nicht signifikant. Der Effekt des Faktors „Auslösung“ wurde mit einem Bonferroni-korrigierten Post-hoc Test untersucht (vgl. Abbildung 4.38). Dabei konnte ein signifikanter Unterschied zwischen der Kondition „Quick“ und „Slow“ mit $p < 0,002$, (2,054; 95% CI[0,672; 3,436]) und der Kondition „Quick“ und „Swipe Out“ mit $p < 0,001$, (2,256; 95% CI[0,966; 3,545]) nachgewiesen werden. Die Nullhypothese H_4 wird damit verworfen.

Geistige Anforderung

Um die geistige Anforderung bei der Interaktion für die Aktivierungsmethoden „Quick Intersection“, „Slow Intersection“ und „Swipe Out“ mit den Ausrichtungsvarianten „Egozentrisch“ und „Allozentrisch“ auszuwerten, wurden die subjektiven

Tabelle 4.12: Mittelwerte und Standardabweichungen für abhängige Variable Geistige Anforderung (n=43)

Kondition	Mittelwert	Standardabweichung
„Quick“ x „Alloz.“	5,721	4,260
„Quick“ x „Egoz.“	5,976	4,440
„Slow“ x „Alloz.“	4,512	3,417
„Slow“ x „Egoz.“	4,721	3,432
„Swipe“ x „Alloz.“	4,919	3,584
„Swipe“ x „Egoz.“	5,244	3,840

Ergebnisdaten aus dem NASA TLX zu den Dimensionen „Geistige Anforderung“, „Leistung“ sowie „Frustration“ betrachtet und die erhobenen Daten ausgewertet. Die Datenreihen „Geistige Anforderung“, „Leistung“ und „Frustration“ wurden mit einem Shapiro-Wilk-Test auf Normalverteilung überprüft. Da dies für die Datenreihen nicht zutraf, die Stichprobengröße jedoch bei $n > 30$ liegt, wird die Analyse der Daten mit parametrischen Verfahren durchgeführt.

Eine deskriptive Analyse des Faktors „Geistige Anforderung“ ist in Tabelle 4.12 abgebildet. Es ist bereits erkennbar, dass die erfassten Mittelwerte und Standardabweichungen ähnlich sind und im unteren Drittel der Skala des NASA TLX liegen. Die Daten wurden mit einer Varianzanalyse weiter untersucht. Ein Mauchly-Test zeigte, dass keine Verletzung der Sphärizität vorlag. Es konnte ein Effekt für den Faktor „Auslösung“ nachgewiesen werden, $F(2, 84) = 5,224$; $p < 0,01$, partielles $\eta^2 = 0,111$. Für den Faktor „Ausrichtung“ konnte kein Effekt nachgewiesen werden $F(1, 42) = 0,934$; $p = 0,339$. Ein Post-hoc durchgeführter paarweiser Vergleich mit Bonferroni-Korrektur zeigte einen signifikanten Unterschied zwischen den Konditionen „Quick Intersection“ und „Slow Intersection“ mit $p < 0,02$ (1,232 95%-CI[0,169; 2,295]), wobei die Kondition „Slow Intersection“ eine geringere subjektive „Geistige Anforderung“ bei den Versuchsteilnehmern erzeugte (vgl. Abbildung 4.39). Die Nullhypothese H_7 wird damit verworfen. Der Faktor „Ausrichtung“ zeigte deskriptiv geringere Mittelwerte für die Faktorstufe „Allozentrisch“, jedoch war der Unterschied nicht signifikant. Die Nullhypothese H_{10} wird angenommen.

Die Analyse der subjektiv wahrgenommenen „Leistung“ zeigt deskriptiv bereits

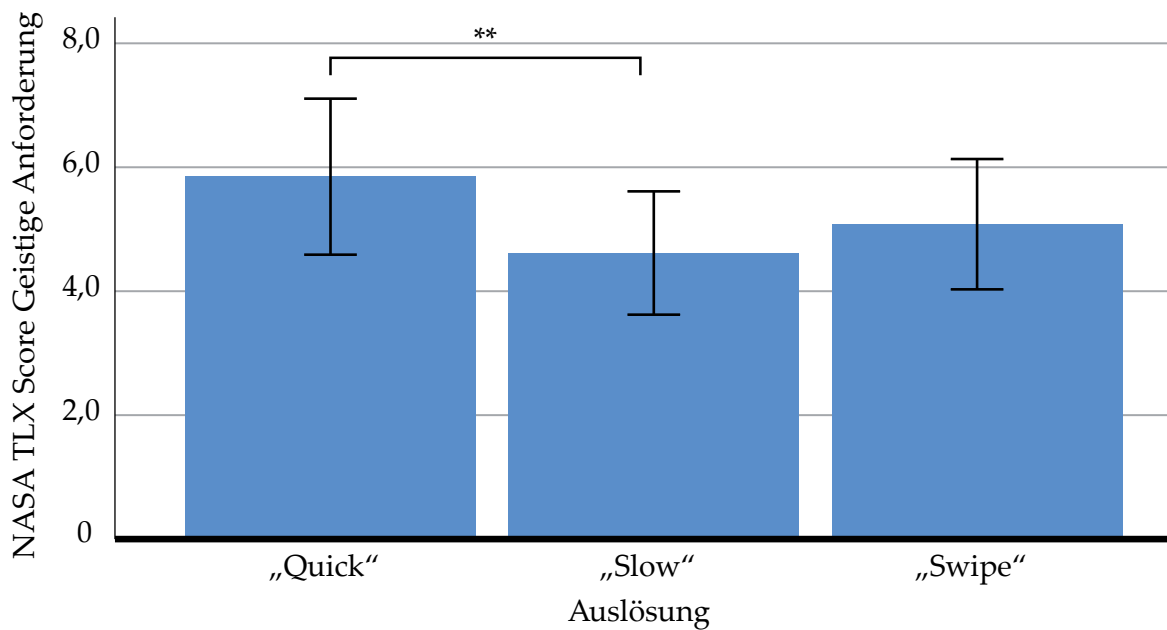


Abbildung 4.39: Boxplots mit 95%-CI für die Geistige Anforderung für den Faktor „Auslösung“

größere Unterschiede bei Bewertung der Konditionen für den Faktor „Quick Intersection“ und „Slow Intersection“, wobei die Versuchsteilnehmer den Faktor „Ausrichtung“ „Egozentrisch“ und „Allozentrisch“ jeweils für die Faktoren Ausrichtung ähnlich bewerteten. Statistisch konnte ein Effekt für den Faktor „Auslösung“ $F(2, 84) = 13,351$; $p < 0,01$; partielles $\eta^2 = 0,241$ nachgewiesen werden. Ein Post-hoc durchgeführter paarweiser Vergleich zeigte, dass die Konditionen „Quick Intersection“ im Vergleich mit „Slow Intersection“ einen signifikanten Unterschied bei der subjektiven Leistungsbewertung zeigte mit $p < 0,001$ (2,616 95%-CI[1,341; 3,892]). Auch der paarweise Vergleich zwischen „Quick Intersection“ mit „Slow Intersection“ erwies sich als statistisch signifikant mit $p < 0,015$ (1,727 95%-CI[0,290; 3,163]). Abbildung 4.40 zeigt einen Vergleich der Mittelwerte für den Faktor „Auslösung“ mit den Konditionen „Quick Intersection“, „Slow Intersection“ und „Swipe Out“. Auf der Skala des NASA TLX (0 = gut; 20 = schlecht) zeigt sich, dass die Versuchsteilnehmer subjektiv im Mittel die beste Leistung mit der Kondition „Slow Intersection“ erbringen konnten. Die Nullhypothese H_8 wird damit verworfen.

Bei Analyse der abhängigen Variable „Frustration“ ergab ein Shapiro-Wilk-Test, dass die Daten nicht normalverteilt sind, jedoch wird aufgrund der Stichprobengröße

Tabelle 4.13: Mittelwerte und Standardabweichung für die subjektiv empfundene Leistung bei Ausführung der Versuchskonditionen (n=43)

Kondition	Mittelwert	Standardabweichung
„Quick“ x „Alloz.“	6,314	4,229
„Quick“ x „Egoz.“	8,465	5,116
„Slow“ x „Alloz.“	4,756	2,894
„Slow“ x „Egoz.“	4,791	3,301
„Swipe“ x „Alloz.“	5,977	3,914
„Swipe“ x „Egoz.“	5,349	3,516

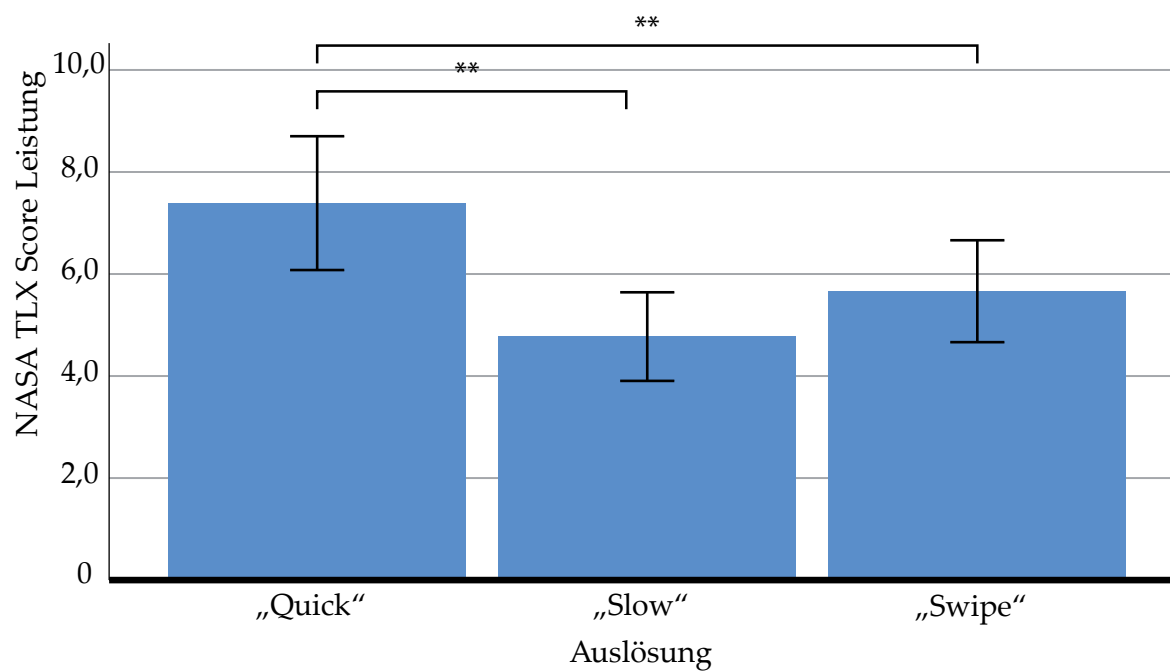


Abbildung 4.40: Boxplots mit 95%-CI der Leistung aus dem NASA TLX für den Faktor „Auslösung“.

Tabelle 4.14: Mittelwerte und Standardabweichung für die subjektiv empfundene Frustration bei Ausführung der Versuchskonditionen (n=43)

Kondition	Mittelwert	Standardabweichung
„Quick“ x „Alloz.“	7,744	5,401
„Quick“ x „Egoz.“	9,105	5,769
„Slow“ x „Alloz.“	4,767	4,192
„Slow“ x „Egoz.“	4,616	3,708
„Swipe“ x „Alloz.“	5,453	4,550
„Swipe“ x „Egoz.“	5,174	4,217

eine Varianzanalyse zum Test auf statistische Effekte verwendet. Zunächst zeigt die deskriptive Datenanalyse vorgenommen, aus welcher hervorgeht, dass sich in den Daten Ausreißer befinden. Da es sich überwiegend um leichte Ausreißer handelt, werden diese in der Stichprobe belassen. Die Mittelwerte mit Standardabweichungen für die Einzelkonditionen der Faktoren „Auslösung“ und „Ausrichtung“ sind in Tabelle 4.14 dargestellt. Die Auslösungsmethode „Quick Intersection“ wurde deutlich höher bewertet, als die Auslösungsmethoden „Slow Intersection“ und „Swipe Out“, dies gilt jeweils für die Ausrichtungen „Egozentrisch“ und „Allozentrisch“.

Der Faktor „Auslösung“ für die abhängige Variable „Frustration“ war gemäß einer Varianzanalyse signifikant $F(2, 84) = 24,649$; $p < 0,001$. Es wurde anschließend ein paarweiser Vergleich der Einzelkonditionen vorgenommen, indem „Quick Intersection“ im Vergleich zu „Slow Intersection“ einen signifikanten Unterschied aufzeigte mit $p < 0,0001$ (3,733 95%-CI[2,119; 5,346]). Ebenfalls signifikant unterschiedlich war die Kondition „Quick Intersection“ im Vergleich zu „Swipe out“ mit $p < 0,0001$ (3,110 95%-CI[1,604; 4,617]). Die Mittelwerte für die Werte „Frustration“ aus dem NASA TLX zum Faktor „Auslösung“ sind in Abbildung 4.41 dargestellt. Damit wird die Nullhypothese H_9 verworfen.

Die abhängige Variable des NASA TLX „Anstrengung“ zeigt bei der Analyse der deskriptiven Werte Unterschiede in der Bewertung zwischen Kondition „Quick Intersection“ und den Konditionen „Slow Intersection“ sowie „Swipe Out“. Eine Varianzanalyse zeigte einen signifikanten Effekt für den Faktor „Auslösung“ $F(2, 84) = 13,657$; $p < 0,0001$; partielles $\eta^2 = 0,241$ und für den Faktor „Ausrichtung“ $F(1, 42) = 4,086$; $p = 0,05$; $\eta^2 = 0,089$ (vgl. Abbildung 4.43). Hypothese H_{12} wird

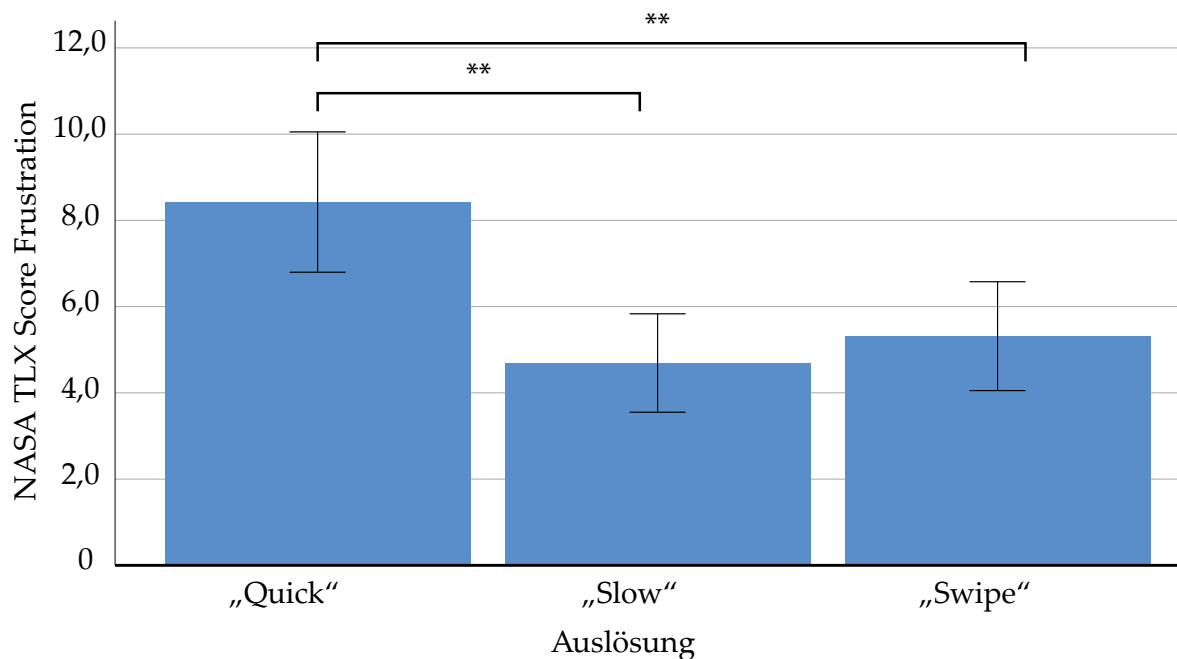


Abbildung 4.41: Boxplots mit 95%-CI der „Frustration“ aus dem NASA TLX für den Faktor „Auslösung“.

damit verworfen. Post-hoc Tests zeigten einen signifikanten Unterschied zwischen den Konditionen „Quick Intersection“ zu „Slow Intersection“ mit $p < 0,0001$ (2,244 95%-CI[0,911; 3,578]) und zwischen „Quick Intersection“ zu „Swipe Out“ mit $p < 0,0001$ (2,000 95%-CI[0,859; 3,141]) (vgl. Abbildung 4.42) unter Berücksichtigung des Faktors „Auslösung“. Der Ausrichtung „Egozentrisch“ wurde subjektiv von den Versuchsteilnehmern als signifikant anstrengender empfunden als die Ausrichtung „Allozentrisch“ (vgl. Abbildung 4.43). Eine Übersicht der deskriptiven Werte für die subjektiv empfundene „Anstrengung“ ist in Tabelle 4.15 dargestellt.

Körperliche Belastung und Beanspruchung

Auf die Ergebnisse der körperlichen Belastung und Beanspruchung wird im folgenden eingegangen. Da die körperlichen Anforderungen über den NASA TLX subjektiv und über objektive Muskelspannung mittels Oberflächenelektromyographie vorgenommen wurde, kann auch gemessen werden, ob die subjektive Empfindung des Versuchsteilnehmers sich von der objektiven körperlichen Belastung und Beanspruchung unterscheidet.

Tabelle 4.15: Mittelwerte und Standardabweichung für die subjektiv empfundene „Anstrengung“ bei Ausführung der Versuchsbedingungen (n=43)

Kondition	Mittelwert	Standardabweichung
„Quick“ x „Alloz.“	6,663	4,437
„Quick“ x „Egoz.“	7,709	4,908
„Slow“ x „Alloz.“	4,837	3,549
„Slow“ x „Egoz.“	5,047	3,894
„Swipe“ x „Alloz.“	5,035	3,591
„Swipe“ x „Egoz.“	5,337	4,105

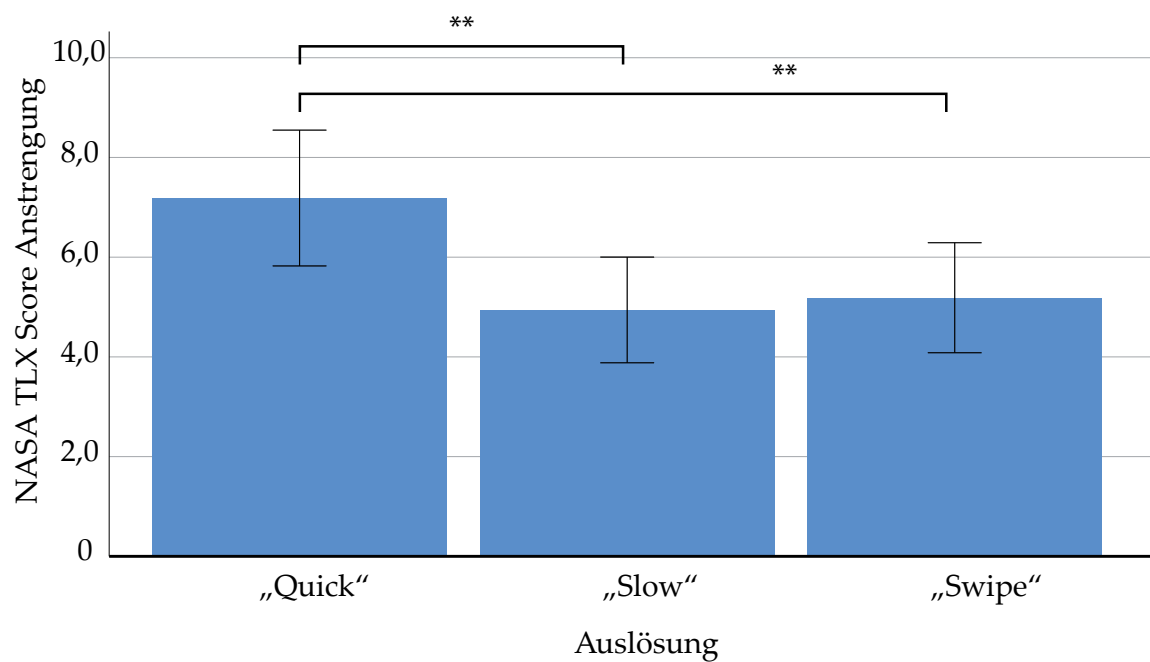


Abbildung 4.42: Boxplots mit 95%-CI der Anstrengung aus dem NASA TLX für den Faktor „Auslösung“.

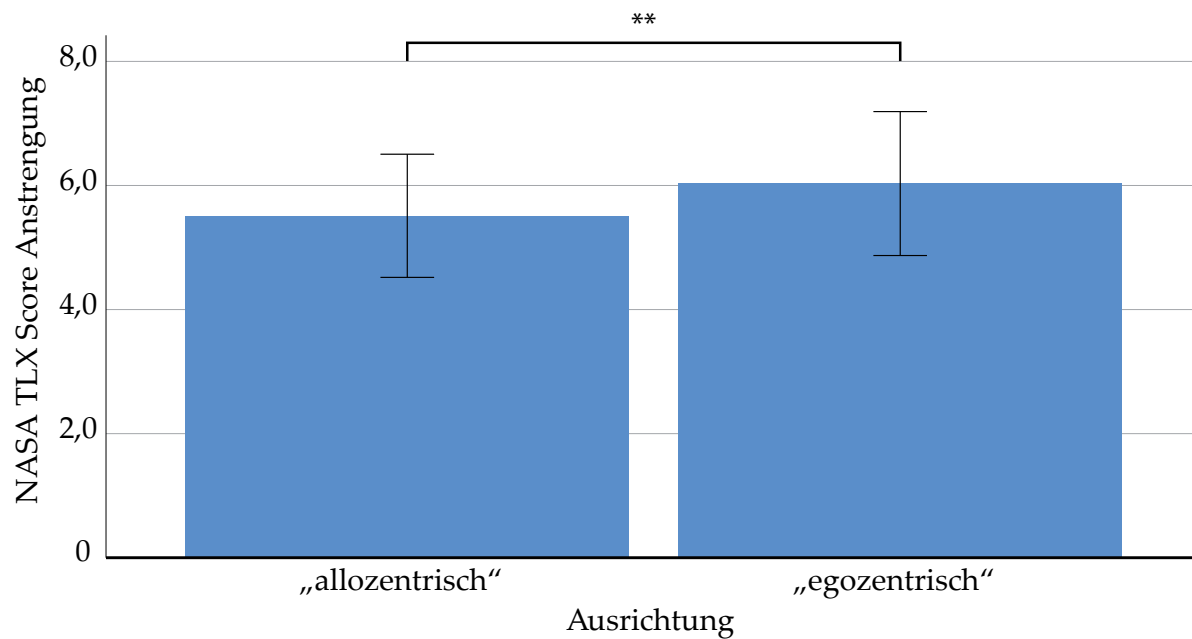


Abbildung 4.43: Boxplots mit 95%-CI der Anstrengung aus dem NASA TLX für den Faktor „Ausrichtung“.

Tabelle 4.16 zeigt die Mittelwerte mit Standardabweichungen für die abhängige Variable „Körperliche Anforderungen“ des NASA TLX. Hier ist zu erkennen, dass die Versuchsteilnehmer unterschiedlich bewertet haben. Die Standardabweichungen haben für die Kondition „Quick Intersection“ höhere Werte als für die Faktorstufen „Slow Intersection“ und „Swipe Out“. Das obere Viertel der Skala des NASA TLX wurde im Maximum über alle Faktorstufen nur ansatzweise erreicht, die Mittelwerte sind im unteren Drittel der Skala angesiedelt. Da die Versuchsteilnehmer für jede Kondition Werte für 0,5 bis 15,5 beziehungsweise 13,5 angaben, wird die unabhängige Variable subjektive „Körperliche Anforderungen“ mit einer Varianzanalyse weiter untersucht. Ein Shapiro-Wilk-Test zeigte zwar, dass die Datenreihen nicht normalverteilt sind, anhand der Stichprobengröße von $n > 30$ kann die Varianzanalyse trotzdem durchgeführt werden. Ein Mauchly-Test des Faktors „Auslösung“ gab, dass die Sphärizität der Daten verletzt war. Deswegen wurde die Varianzanalyse mit einem Greenhouse-Geisser-Korrekturverfahren berechnet. Im Faktor „Auslösung“ konnten signifikante Unterschiede festgestellt werden mit $F(1,745; 73,277) = 15,725$ $p < 0,0001$, partielles $\eta^2 = 0,272$. Ein Post-hoc Test mit Bonferroni-Korrektur ergab, dass signifikante Unterschiede in der subjektiven Bewertung der „Körperlichen Anforderungen“

Tabelle 4.16: Deskriptive Analyse der subjektiven „Körperlichen Anforderung“ aus dem NASA TLX Fragebogen (n=43)

Kondition	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung
„Quick“ x „Alloz.“	0,5	15,5	6,395	4,168
„Quick“ x „Egoz.“	0,5	15,5	6,907	4,535
„Slow“ x „Alloz.“	0,5	15,5	4,872	3,204
„Slow“ x „Egoz.“	0,5	15,5	5,070	3,720
„Swipe“ x „Alloz.“	0,5	13,5	4,640	3,121
„Swipe“ x „Egoz.“	0,5	15,5	5,221	3,644

zwischen den Faktorstufen „Slow Intersection“ und „Quick Intersection“ $p < 0,0001$ (1,680 95%-CI[0,774; 2,587]) sowie zwischen den Faktorstufen „Slow Intersection“ und „Swipe Out“ vorliegen $p < 0,0001$ (1,721 95%-CI[0,730; 2,711]) (vgl. Abbildung 4.44) Hypothese H_{13} wird damit verworfen.

Die Einzelkonditionen wurden für jeden Versuchsdurchlauf pro Teilnehmer permutiert. Zunächst werden die gemittelten Daten pro untersuchtem Muskel auf Unterschiede bei der Bedienung der Einzelkonditionen untersucht. Dabei konnten für die Muskeln „Interosseus“, „Deltoides“ und „Trapezius pars descendens“ keine Unterschiede nachgewiesen werden. Damit können die Nullhypothesen H_{14} , H_{17} und H_{18} angenommen werden. Bei Erhebung der Messdaten für den „Flexor Carpi Ulnaris“ Muskel löste sich bei einer Versuchsperson während des Messvorgangs eine Oberflächenelektrode, was dazu führte, dass die entsprechende Person aus der Stichprobe für den entsprechenden Muskel entfernt wurde. Eine Varianzanalyse mit Greenhouse-Geisser-Korrektur ergab, dass Unterschiede in der muskulären Belastung des „Flexor Carpi Ulnaris“ für den Faktor „Auslösung“ auftraten $F(1,561; 61,982) = 3,882$ $p = 0,035$; partielles $\eta^2 = 0,087$. Der Effektstärke nach ist der Effekt als „Effekt mittlerer Stärke“ einzustufen. In einem paarweisen Vergleich der Faktorstufen des Faktors „Auslösung“ zeigt, dass für die Faktorstufen „Quick Intersection“ im Vergleich zu „Slow Intersection“ signifikante Unterschiede der muskulären Belastung auftraten mit $p = 0,045$ (0,276 95%-CI[0,005; 0,547]). Der Faktor „Ausrichtung“ war für den Muskel „Flexor Carpi Ulnaris“ nicht signifikant $F(1, 41) = 0,163$; $p = 0,688$. Die Nullhypothesen H_{15} und H_{19} werden damit verworfen.

Bei einem Versuchsteilnehmer lösten sich bei der Messung die Oberflächenelektro-

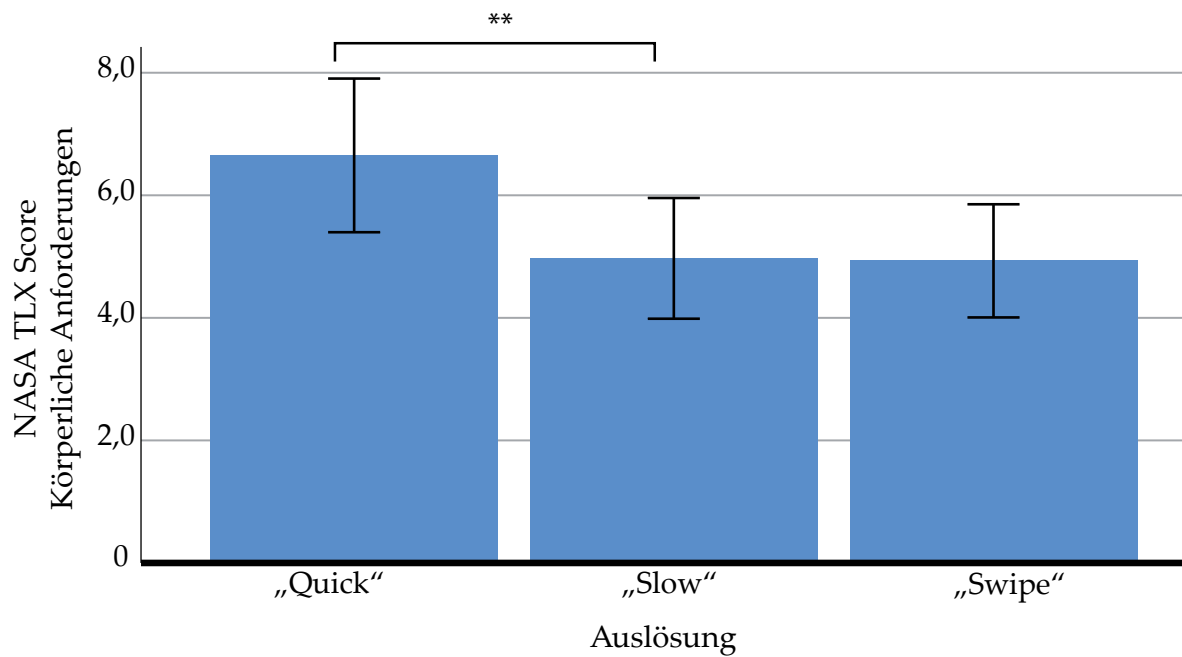


Abbildung 4.44: Boxplots mit 95%-CI der Körperlichen Anforderung aus dem NASA TLX für den Faktor „Auslösung“.

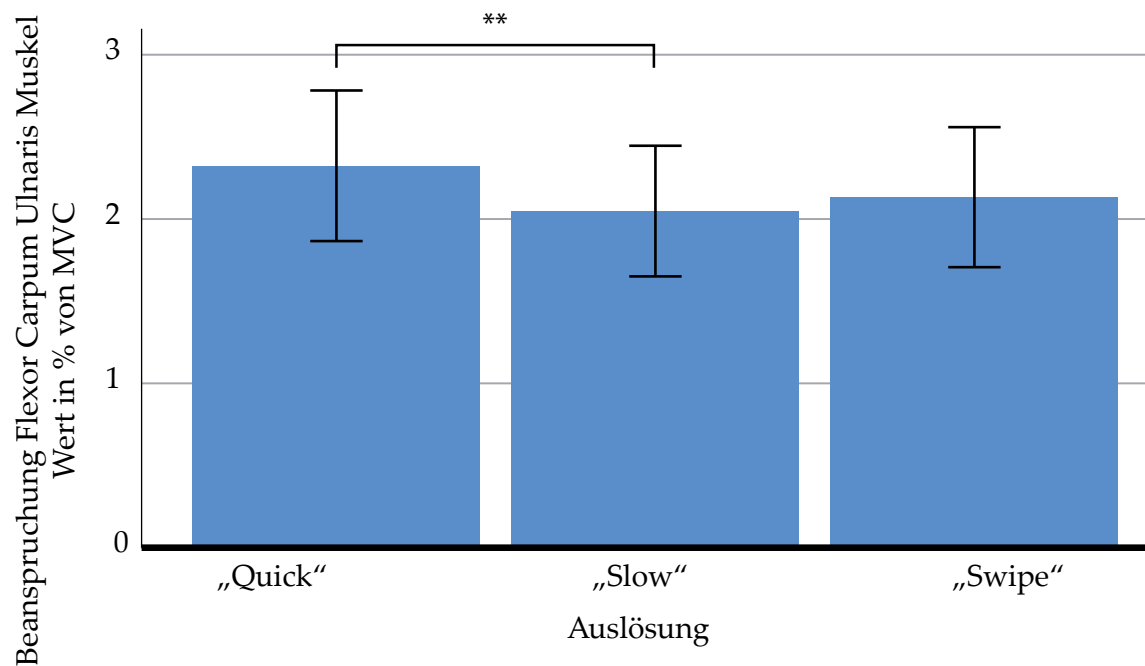


Abbildung 4.45: Boxplots mit 95%-CI für die muskuläre Belastung des „Flexor Carpi Ulnaris“ Muskel.

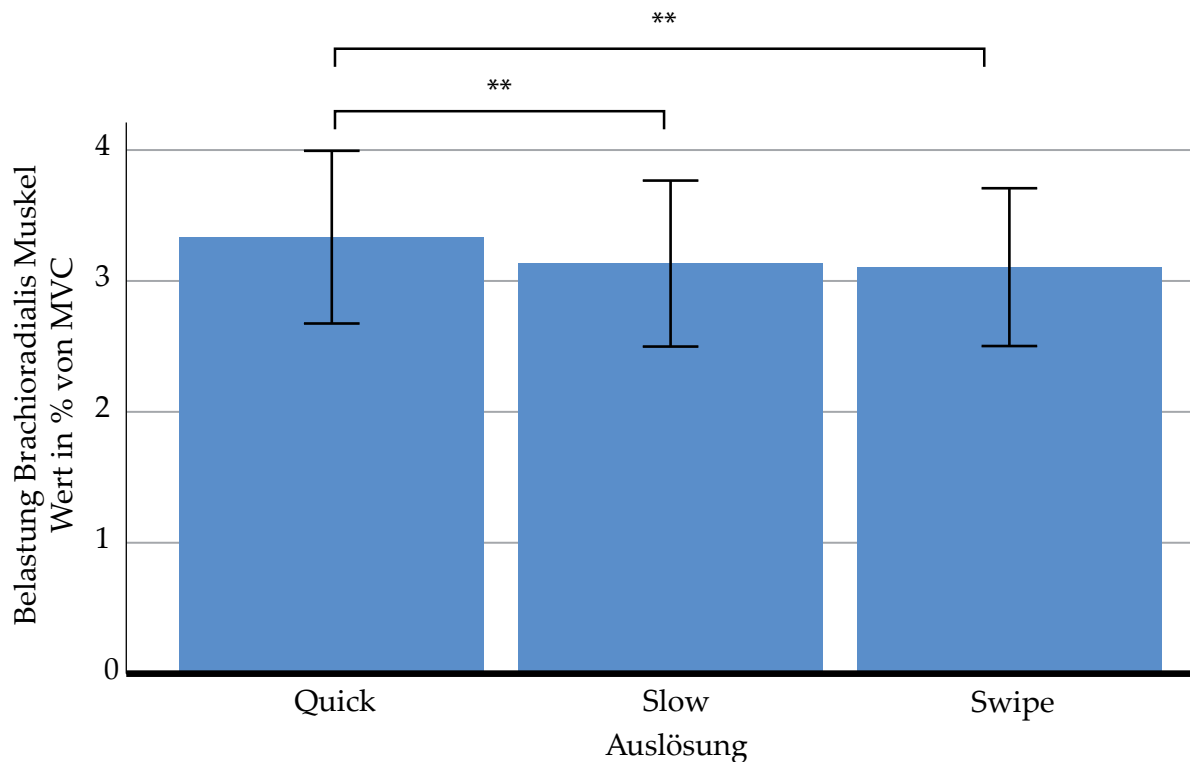


Abbildung 4.46: Boxplots mit 95%-CI für die muskuläre Belastung des „Brachioradialis“ Muskel.

den für den „Brachioradialis“ während des Messvorgangs. Dieser Fall musste aus der Stichprobe entfernt werden, wodurch die Analyse der Daten für den „Brachioradialis“ mit einer Stichprobe von $n = 42$ durchgeführt wurde. Hier zeigten sich ebenfalls signifikante Unterschiede mit $F(2, 82) = 9,797$; $p < 0,001$; partielles $\eta^2 = 0,193$ für den Faktor „Auslösung“. Ein Post-hoc durchgeführter paarweiser Vergleich ergab, dass die Belastung des Muskels „Brachioradialis“ signifikant unterschiedlich im Vergleich für die Faktorstufen „Quick Intersection“ und „Slow Intersection“ $p = 0,003$ (0,202 95%-CI[0,061; 0,342]) sowie „Quick Intersection“ im Vergleich mit „Swipe Out“ $p = 0,002$ (0,229 95%-CI[0,077; 0,381]) waren (vgl. Abbildung 4.46). Der Faktor „Ausrichtung“ war nicht signifikant $F(1, 41) = 0,832$; $p = 0,367$. Die Nullhypothese H_{16} wird damit verworfen.

Die Analyse des Faktors „Ausrichtung“ führte bei keinem mit Oberflächenmyographien überprüften zu einem signifikanten Ergebnis. Die Nullhypothese H_{20} und H_{24} wird folglich angenommen. Da für die im Schulterbereich liegenden Muskeln „Trape-

zius pars descendenz“ und den „Deltoides pars acromialis“ kein Effekt gemessen werden konnte, können die Nullhypothesen H_{21} und H_{22} angenommen werden. Ein signifikanter Effekt für die Muskulatur des Hand-Unterarm-Bereiches hat sich für die Muskeln „Brachioradialis“ und „Flexor Carpi Ulnaris“ bestätigt. Damit kann die Nullhypothese H_{23} verworfen werden.

4.3.11 Diskussion

Die zweite Versuchsreihe wurde mit dem Ziel durchgeführt, unterschiedliche Konzepte berührungsloser Interaktionsvarianten zur Manipulation von Daten in einer stereoskopischen Desktopumgebung zu untersuchen und die Beanspruchung des Nutzers während der Interaktion zu evaluieren. Dabei wurde anhand klassischer Interaktion aus der Mensch-Computer-Interaktion und dem Stand der Forschung mit dem Hintergrund der ersten Studie und dem Nutzungskontext die drei Auslösungsvarianten „Quick Intersection“, „Slow Intersection“ und „Swipe Out“ entwickelt, implementiert und schließlich in der zweiten Versuchsreihe evaluiert. Dabei wurde auf Fragestellungen aus der Arbeitswissenschaft eingegangen, welche die Performanz der Eingabe, sowie geistige Beanspruchung und körperliche Belastung und Beanspruchung quantifizieren und einen Vergleich der unterschiedlichen Auslösungen bewertbar machen. Die Interaktionsvarianten wurden so gestaltet, dass diese „Egozentrisch“ und „Allozentrisch“ ausgerichtet waren, diese Varianten wurden als Faktor für die Ausrichtung der Dialoge in der Studie mit untersucht. Die Versuchsreihe erfolgte mit zufällig ausgewählten, bezahlten Versuchspersonen, welche einen ausreichenden Visus und stereoskopisches Sehvermögen besaßen. Hinsichtlich des Faktors „Auslösung“ wurde erwartet, dass Versuchsteilnehmer die Lösung der Aufgabe, die Umklassifizierung eines Symbols nach Vorgabe über eine „Pie Menu“-Struktur vorzunehmen, mit einer der drei zur Verfügung gestellten Varianten effizienter und mit geringerer Beanspruchung durchführen können. Es wurde zudem davon ausgegangen, dass die „Ausrichtung“ der „Pie Menu“ Struktur Einfluss auf die Performanz, Geistige Beanspruchung sowie die körperliche Belastung und Beanspruchung ausübt. Dazu wurden Fehlerraten, Zeitwerte zur vollständigen Bearbeitung der Aufgabe, subjektive Anforderungen über den NASA TLX Fragebogen und Messungen der muskulären Belastung über Oberflächenelektromyographie erhoben. Bei der Gestaltung der Interaktionsdialoge wurden unterschiedliche Auslösungsmechanismen

untersucht, mit denen ein Interaktionsdialog ausgelöst werden kann. Zur Auslösung der Faktorstufe „Quick Intersection“ musste die Zeigefingerspitze des Nutzers den Schwellwert von 25mm pro Sekunde erreichen. Diese Geschwindigkeit war minimal erforderlich, um den Interaktionsdialog auszulösen. Bei der Faktorstufe „Slow Intersection“ war notwendig zwei sichtbare Ebenen hintereinander zu durchdringen. Faktorstufe „Swipe Out“ erforderte dagegen wieder eine Mindestgeschwindigkeit der Zeigefingerspitze von 25mm pro Sekunde für eine Auslösung. Die Versuchsteilnehmer durften die jeweiligen Konditionen in einer kurzen Testphase nach einer kurzen Erklärung üben und waren für die Durchführung des Versuches in der Hinsicht leicht trainiert. Die drei Faktorstufen wurden mit dem Faktor „Ausrichtung“ bestehend aus den Faktorstufen „Egozentrisch“ und „Allozentrisch“ multipliziert.

Die Performanz der insgesamt sechs Interaktionsdialoge über die 3x2 Faktoren „Auslösung“ und „Ausrichtung“ war unterschiedlich ausgeprägt. Die Unterschiede waren über die gesamte Stichprobe so eindeutig, dass die Unterschiede in den meisten Fällen hochsignifikant waren. Die Performanz definiert sich hauptsächlich durch eine schnelle Ausführungsmöglichkeit eines Interaktionsdialoges mit möglichst geringer Fehleingabe. Eine Kombination aus beiden Faktoren ist für eine hohe Performanz also wünschenswert. Die Ausführungsgeschwindigkeit für die Konditionen „Quick“ und „Swipe Out“ war hoch signifikant unterschiedlich, obgleich die Auslösungsgeschwindigkeit für beide Konditionen gleich 25mm pro Sekunde betrug. Für die Kondition „Swipe Out“ jedoch musste die Fingerspitze nicht in das Displayvolumen, wie bei Kondition „Quick“ hineinbewegt werden, sondern die Ausführung erfolgte parallel. Damit war die flüssige Ausführung einer Gesamtbewegung möglich, da an die Annäherungsbewegung an das Zielobjekt zur Auslösung des Interaktionsdialoges direkt die Auswahlbewegung für die Interaktion angeschlossen werden konnte, indem der Impuls der Fingerbewegung mit einer leichten Winkeländerung erhalten werden konnte. Für die Kondition „Slow“ musste die Fingerspitze abgebremst und neu bis auf den notwendigen Schwellwert beschleunigt werden, um den Interaktionsdialog auszulösen. Der Faktor „Ausrichtung“ bestimmt, ob der Interaktionsdialog in Bewegungsrichtung, also „egozentrisch“, oder immer oberhalb des Zielobjektes erscheint. Die Versuchsteilnehmer waren in der Hinsicht zwar informiert, dass in der „egozentrischen“ Faktorstufe der Interaktionsdialog in Bewegungsrichtung erscheinen würde, wodurch theoretisch die Erhaltung des Bewegungsimpulses der Zeigefingerspitze noch leichter würde, da der Anpassungswinkel der Bewegung klei-

ner ist und somit eine noch flüssigere Bewegung möglich sein müsste. Die Faktorstufe „Allozentrisch“ weist jedoch trotzdem signifikant schnellere Auslösungszeiten auf als die Faktorstufe „Egozentrisch“. Die Tatsache, dass ein Interaktionsdialog immer an der gleichen Stelle erscheint, wirkt somit aus Sicht der Ergebnisse für den Versuchsteilnehmer intuitiver, als wenn sich die Position des Dialoges an die Bewegung des Versuchsteilnehmer anpasst. Aus Sicht der „Auslösungszeit“ ist die Faktorstufe „Swipe Out“ in Kombination mit der Faktorstufe „Allozentrisch“ war signifikant schneller auslösbar, als die Faktorstufen „Quick Intersection“ und „Slow Intersection“. Zieht man nun jedoch die Fehlerrate hinzu, wird deutlich, dass in den Konditionen „Swipe Out“ und „Swipe Out“ wesentlich mehr Fehleingaben erfolgten, als etwa für die Faktorstufen „Quick Intersection“ und „Slow Intersection“. Der Faktor „Ausrichtung“ ist hier nicht signifikant, liegt aber für die Faktorstufe „Egozentrisch“ etwas niedriger im Mittelwert als für die Stufe „Allozentrisch“. Die Fehlerraten für den Faktor „Auslösung“ waren über alle drei Faktorstufen signifikant und für die Faktorstufe „Swipe Out“ stark erhöht im Vergleich zu „Quick Intersection“ und „Slow Intersection“. Die Faktorstufe „Slow Intersection“ wies die niedrigste Fehlerrate auf. Für die objektiv ermittelten Daten der Auslösungszeit und der Fehlerrate ist die Kondition „Slow Intersection x Allozentrisch“ mit der stabilsten Ausführung. Die Ausrichtungen „Allozentrisch“ und „Egozentrisch“ hatten nur bedingt Einfluss auf die Fehlerrate, nahmen jedoch signifikanten Einfluss auf die Auslösungszeit. Auch subjektiv empfanden die Versuchsteilnehmer die Faktorstufe „Quick Intersection“ als zeitintensiver bei der Benutzung, als die übrigen beiden Faktorstufen des Faktors „Auslösung“. Deskriptiv liegen die Faktorstufen „Slow Intersection“ und „Swipe Out“ etwa auf gleicher Höhe im Bezug auf die subjektive zeitliche Anforderung. Dass für die Faktorstufe „Swipe Out“ signifikant häufiger Fehlauflösungen stattfanden, als für die Faktorstufe „Slow Intersection“ hat sich auf die subjektive Zeitanforderung nicht ausgewirkt.

Der Faktor „Ausrichtung“ hatte keinerlei Einwirkung auf die Versuchsteilnehmer im Bezug auf ihre subjektive Geistige Beanspruchung. Die Annahme, dass eine egozentrische Ausrichtung eines Interaktionsdialoges eine geringere mentale Last verursacht, als eine allozentrische, bestätigt sich damit nicht. Jedoch konnte für den Faktor „Auslösung“ gezeigt werden, dass die Faktorstufe „Slow Intersection“ zu einer subjektiv signifikant geringeren geistigen Beanspruchung führt. Die Bewegung des Zeigefingers zur Auslösung der Kondition muss zwar in die Tiefe und damit in

das Displayvolumen ausgeführt werden, jedoch ist durch die langsame Ausführung auch wesentlich mehr Kontrolle über die Ausführung möglich, was sich auch in der niedrigeren Fehlerrate gezeigt hat. Die Fehlerrate war für die Faktorstufe „Swipe Out“ zwar hoch, im Mittel sind die Werte für die subjektive geistige Beanspruchung für die Faktorstufe „Swipe Out“ jedoch geringer, als für die Faktorstufe „Quick Intersection“. Ganz ähnlich sehen die Werte für die subjektiv empfundene Leistung aus. Die Versuchsteilnehmer bewerteten die Leistung insgesamt für jede Kondition eher gut, also auf der NASA TLX Skala zwischen fünf und sieben. Die Kondition „Quick Intersection“ ist dabei signifikant schlechter im Vergleich mit den Konditionen „Slow Intersection“ und „Swipe Out“ bewertet worden. Letztlich führte jede Faktorstufe des Faktors „Auslösung“ zum gewünschten Ziel. Da es in der entsprechenden Dimension „Leistung“ um die Bewertung der eigenen Leistung geht, und um das Erreichen der vorgegebenen Ziele und ihrer Verfolgung, war diese Faktorstufe in ihrer Ausführung möglicherweise unzuverlässig oder schwierig zu erlernen. Dies spiegelt sich sehr deutlich in der subjektiven Bewertung der Frustration im NASA TLX bei der Aufgabenausführung wieder. Der Versuchsteilnehmer soll angeben, wie sehr die Versuchsaufgabe zu Verunsicherung, Entmutigung, Irritation, Stress und Ärger geführt hat. Für die Faktorstufe „Quick Intersection“ des Faktors „Auslösung“ lagen diese Werte zwischen sieben und zehn bei einer 20-stufigen Skala, also noch immer noch zwischen „gering“ bis „mittel“ und wurde damit signifikant schlechter bewertet, als die Faktorstufen „Slow Intersection“ (Werte von vier bis sechs) oder „Swipe Out“ (Werte von fünf bis sieben).

Hinsichtlich der Messwerte für die subjektive „Anstrengung“ aus dem NASA TLX sah die Bewertung der Versuchsteilnehmer für den Faktor „Auslösung“ ähnlich aus. Für die subjektive Anstrengung waren alle 3x2 Faktorstufen signifikant unterschiedlich. Die „allozentrische“ Ausrichtung des Interaktionsdialoges wurde von den Versuchsteilnehmern als leicht weniger anstrengend bewertet, der Unterschied war jedoch signifikant auf einem Level von $\alpha = 0,01$. Diese Beobachtung ist, wie zuvor für den Faktor „Ausrichtung“, nicht erwartet worden, da die Bewegung der Zeigefingerspitze mit einer „egozentrischen“ Ausrichtung des Interaktionsdialoges flüssiger verlaufen, und damit weniger anstrengend sein sollte. Die Auswertung der Oberflächenmyographie bestätigt diese höhere Anstrengung für den Faktor „Ausrichtung“ jedoch nicht. Hier konnte für keinen der untersuchten Muskeln ein signifikantes Ergebnis für die Faktorstufen „Allozentrisch“ oder egozentrisch gefunden werden.

Die aufgezeichneten Werte für den Faktor „Auslösung“ erzeugten keine Unterschiede für die Schultermuskulatur, für welche der „Trapezius pars Descendenz“ und der „Deoltoideus pars Acromialis“ mit Oberflächenelektromyographie untersucht wurden. Es konnten jedoch Effekte für den Unterarmbereich gefunden werden, die zeigen, dass der Faktor „Auslösung“ signifikante Unterschiede in der Belastung des „Flexor Carpum Ulnaris“ sowie des „Brachioradialis“ hervorruft. Die Faktorstufe „Quick Intersection“ des Faktors „Auslösung“ wies signifikant höhere Messwerte in % MVC auf, als die Faktorstufen „Slow Intersection“ und „Swipe Out“ wobei die Faktorstufe „Slow Intersection“ die geringste muskuläre Belastung im Unterarmbereich erzeugte.

5. Schlussfolgerungen und Gestaltungsempfehlungen für die Praxis

Unter Berücksichtigung der durchgeführten empirischen Studien werden nun Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen gezogen und auf die Forschungsfragen eingegangen, welche in Kapitel 3.7 aufgestellt wurden. Anschließend werden Gestaltungsempfehlungen aus den erzielten Forschungsergebnissen abgeleitet.

1. Welche abstrakte Darstellung einer menschlichen Hand kann bei der Interaktion mit Daten in einer stereoskopischen Desktopumgebung ergonomisch eingesetzt werden?

Die Gestaltung der Handmodelle, welche in der vorliegenden Arbeit untersucht wurden, sind auf Basis neuroergonomischer Grundlagen aus der Forschung aufgebaut. Es wurde die Annahme getroffen, dass das minimalistische Modell einer Punktwolke eine ausreichende Erkennung der Hand in der Bewegung ermöglicht, um Zeigebewegungen auf Zielobjekte durchführen zu können. Dabei hat sich die Annahme nicht bestätigt, dass diese Darstellung zur Interaktion in einer stereoskopischen Desktopumgebung ausreicht, um eine hinreichende und erkennbare Assoziation mit der menschlichen Hand zu erzeugen. Da bereits in der Gestaltungsvorgabe berücksichtigt wurde, dass ein Handmodell zur Interaktion mit Datensätzen möglichst minimalistisch sein soll, um keine Information während der Interaktion zu verdecken, wurden weitere Stäbchenmodelle mit dem Punktwolkemodell verglichen. Dazu wurde eine grundlegende Interaktionsaufgabe zum Zeigen auf virtuelle Zielobjekte anhand einer Fitts'schen Zeigaufgabe untersucht. Dabei stellte sich heraus,

dass eine nahe Approximation der menschlichen Hand mit möglichst dünnen Stäbchenverbindungen zwischen den Gelenkpunkten sich als vielversprechend für die Interaktion in stereoskopischen Desktopumgebungen darstellt. Aus der empirischen Untersuchung konnte abgeleitet werden, dass ein solches Stäbchenmodell signifikant bessere Bewegungszeiten als das Punktwolkenmodell erzeugt, wenn es um Zeigebewegungen auf stereoskopische Ziele in verschiedenen stereoskopischen Tiefenebenen geht. Die Tiefenhinweise welche durch die Modellierung und Darstellung des Handmodells gegeben sind, stellen dem Nutzer einen Anhaltspunkt zur Einschätzung der stereoskopischen Tiefe dar und unterstützen bei der Antizipation zum Treffen eines Zielobjektes. Fehlen diese Tiefenhinweise, fehlt auch die Referenz in der stereoskopischen Umgebung und die Treffsicherheit für Ziele in der stereoskopischen Tiefe ist geringer. Bei der Gestaltung eines Handmodells kann eine abstrakte Form gewählt werden, die vom Anwendungsfall abhängig ist und möglichst wenig visuelle Verdeckung erzeugt. Vom Stäbchenmodell bis zur komplexen Darstellung eines konvexen Handmodells ermöglichen die meisten Modelle ausreichend Immersion, um als Zeiger in virtuellen Welten zu dienen, solange die Erkennbarkeit über alle dargestellten Dimensionen als menschliche Hand hinweg gewährleistet bleibt. Gerade aus ergonomischer Sicht muss bei der Gestaltung der Handmodelle eine gute Sichtbarkeit gewährleistet bleiben, da sonst mentale oder körperliche Belastungsfaktoren entstehen, indem die Darstellung nicht mehr als Handmodell erkannt wird und grundlegende Aufgaben nicht ausgeführt werden können. Fehlt die Assoziation bei der Betrachtung des Modells zur menschlichen Hand, würden wichtige Eigenschaften, welche für die gestische Interaktion eingesetzt werden können (greifen, zeigen, spreizen) verloren gehen.

Die zweite Forschungsfrage beschäftigt sich mit der Entwicklung einer geeigneten Dialoggestaltung für stereoskopische Anzeigesysteme, welche mit einem minimalistisch visualisierten Handmodell bedient werden kann und welche Auswirkungen die „Mid Air“-Interaktion auf ergonomische Faktoren hat:

2. Welche Interaktionsform eignet sich für die Dialoggestaltung in stereoskopischen Desktopumgebungen und welchen Einfluss haben Ausrichtungsfaktoren bei der „Mid-Air“-Interaktion auf die Ergonomie?

Die untersuchten Interaktionsformen wurden auf Basis der analysierten Literatur gestaltet und entwickelt und für die Verwendung in einem stereoskopischen Desкто-

psystem angepasst. Use Cases aus dem maritimen Bereich wurden als Grundlage für die Gestaltung des Interaktionsszenarios verwendet, welche zuvor in Experteninterviews mit Experten aus der maritimen Domäne diskutiert wurden. Aus den Use Cases wurde ein einfaches Szenario herausgearbeitet und in der stereoskopischen Lagedarstellung prototypisch umgesetzt. Um die gestellte Forschungsfrage aus Sicht der Forschungsergebnisse zu beantworten, wird zunächst das Kriterium der Performanz bei Erfüllung der Zielaufgabe betrachtet. Diese hat in der Folge Einflüsse auf die ebenfalls bewerteten ergonomischen Faktoren, welche unter anderem durch mentale und körperliche Belastungsmessungen erfasst wurden. In der Versuchsreihe B zeigte der Interaktionsdialog „Slow Intersection“ die beste Performanz mit geringen Ausprägungen für die erfassten Belastungsfaktoren. Bei Gestaltung dieses Interaktionsdialoges wurde davon ausgegangen, dass durch die leicht mögliche Auslösung die Fehlerrate deutlich erhöht ist. In der Untersuchung hat sich jedoch herausgestellt, dass die langsame und kontrollierte Bewegung des Zeigefingers bei der „Mid Air“ Interaktion eine signifikant geringere Fehlerrate erzeugte. Die Interaktionsdialoge „Quick Intersection“ und „Swipe Out“, welche mit einem Schwellwert über Geschwindigkeit in mm/s ausgelöst werden mussten, schnitten in der Performanz schlechter ab, wobei es noch signifikante Unterschiede zwischen den Bewegungen in die Tiefe des stereoskopischen Displayvolumens und Bewegungen parallel zur Sichte Ebene gab. Die Bewegung der Zeigefingerspitze in Faktorstufe „Swipe Out“, welche parallel zur Sichte Ebene ausgeführt werden musste, besitzt einen großen Geschwindigkeitsvorteil, welcher darauf zurückzuführen ist, dass die Bewegung des Zeigefingers sehr viel flüssiger ausgeführt werden kann, als für Bewegungen, welche in die Tiefe des Displayvolumens ausgeführt werden mussten. Da häufigere Richtungsänderungen für die Bewegungen in die Stereoskopische Displaytiefe für die Faktorstufen „Quick Intersection“ und „Slow Intersection“ notwendig sind, wurde davon ausgegangen, dass hier durch Richtungsänderungen bei der Bewegung der Zeigefingerspitze größere Belastungen entstehen und die Interaktion insgesamt länger dauert. Dies hat sich im Versuch bestätigt, jedoch konnten die Versuchsteilnehmer die Bewegung der Zeigefingerspitze zur Auslösung der Faktorstufe „Slow Intersection“ wesentlich kontrollierter ausführen, da kein Schwellwert erreicht werden musste. Trotzdem war die Fehlauslösungsrate gering, entgegen der Annahme bei der Gestaltung des Interaktionsdialoges. Die langsame und kontrollierte Bewegung führte auch insgesamt zu einer geringeren Belastung, zunächst aus subjektiver Sicht des Versuchsteilnehmers, und zu signifi-

kant geringerer muskulären Belastung für die Auslösung „Slow Intersection“. Die Ausrichtung des Dialoges hat wenig Auswirkungen auf die Performanz oder die Belastung und Anforderungen der Versuchsteilnehmer ausgeübt. Die Bewertung der subjektiven Anstrengung war für die egozentrische Ausrichtung der Interaktionsdialoge signifikant höher, ebenso wie die Ausführungszeit. Eine Verbesserung der Bedienung tritt also durch die Ausrichtung des Interaktionsdialoges nicht ein, oder sie hat keinen Einfluss auf die Interaktion. Verallgemeinert kann also aus den Ergebnissen abgeleitet werden, dass die Möglichkeit der langsamen Auslösung eines Interaktionsdialoges zu einer höheren Kontrollierbarkeit führt. Schnell erforderliche Ausführungen haben dagegen die Bearbeitungszeit der gestellten Aufgabe nicht reduziert, sondern im gegebenen Fall die Fehlerrate erhöht. Eine aus ergonomischer Sicht gute Gestaltung eines Interaktionsdialoges für die „Mid Air“ Interaktion lässt möglichst wenig Fehleingaben zu. Dabei darf die Auslösung des Dialoges nicht so schwierig sein, dass mentale und körperliche Belastung ansteigen und die Fehlerrate vermehrt ansteigt. Ein Schwellwert zur Auslösung eines Interaktionsdialoges hat sich für den Einsatz in einem Interaktionskonzept für die „Mid Air“ Interaktion als belastend und fehleranfällig herausgestellt (Varianten „Quick Intersection“ und „Swipe Out“). Eine zweistufige Auslösung dagegen, welche räumlich voneinander getrennt ist, ermöglichte eine recht geringe Fehlerrate mit hochsignifikant besseren Ergebnissen in Betracht auf die Ergonomie und ausreichend Performanz in Bezug auf die Zeit für die Bearbeitung der Aufgabe.

6. Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde eine stereoskopische maritime Lagedarstellung mit einer „Mid Air“ Interaktion entwickelt und untersucht. Dazu wurden zunächst Experten aus dem maritimen Umfeld zu maritimen Lagedarstellungen im Allgemeinen und zu Anforderungen für dreidimensional gestaltete maritime Lagedarstellungen befragt. Aus den Expertengesprächen wurden Szenarien für mögliche Einsätze abgeleitet und Vorteile von dreidimensionalen Visualisierungen diskutiert. Unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus den Experteninterviews wurde ein Prototyp mit einer stereoskopischen Visualisierung von einem Unterwasserbodenprofil entwickelt und ein geeignetes „Mid Air“ Interaktionskonzept erarbeitet und in den Prototyp implementiert. Hierzu wurde ein Konzept der natürlichen Interaktion verwendet, für welches verschiedene Handmodelle basierend auf neuroergonomischen Studien gestaltet wurden. Anschließend fand ein Vergleich der Handmodelle anhand einer Fitts'schen Zeigeaufgabe in einer empirischen Studie (Versuchsreihe A) statt. Dadurch wurde ein Handmodell für die Verwendung in der stereoskopischen Visualisierung validiert. Das Handmodell mit der besten Performanz wurde dazu ausgewählt. Es konnte gezeigt werden, dass eine minimalistische Darstellung eines Handmodells genug Immersion erzeugt, um als Zeigewerkzeug in der stereoskopischen Anzeigenumgebung zu funktionieren, jedoch noch ausreichend Tiefenhinweise vorhanden sein müssen, um zielgenaue Zeigebewegungen zu ermöglichen. Desweiteren wurde auf Basis wissenschaftlicher Literatur ein Interaktionsdialogkonzept zur Interaktion mit maritimen Datensätzen konzipiert und in die stereoskopische Lagedarstellung integriert. Um eine möglichst ergonomische Interaktion bei der „Mid Air“ Interaktion zu gewährleisten, wurden drei unterschiedliche Auslösungsmechanismen entwickelt und in einer empirischen Studie miteinander verglichen (Versuchsreihe B). Die Untersuchungen zeigten, dass egozentrische Ausrichtungen bei „Pie Menu“ Interaktionsdialogen mit „Mid Air“ Interaktion keinen besonderen Vorteil bringen, obwohl die ausgeführten

Bewegungsbahnen mit weniger Richtungsänderungen verbunden waren. Stattdessen ist eine allozentrische Ausrichtung, welche an immer gleicher Stelle vom Zielobjekt angezeigt wird, performanter. Eine langsam, kontrolliert durchführbare Bewegung ohne Geschwindigkeitsschwellwert hat sich als ergonomische Variante zur Auslösung von Dialogstrukturen ergeben. Als Ergebnis aus den beiden Studien wurden Gestaltungsempfehlungen für Handmodelle in stereoskopischen Desktopumgebungen gegeben sowie Gestaltungsempfehlungen für die Gestaltung von Dialogstrukturen für stereoskopische Systeme zur Datenanzeige.

Die in der stereoskopischen Lagedarstellung untersuchten Szenarien bezogen sich im vorliegenden Stand auf einfache Aufgaben, wie Zeigebewegungen oder die Manipulation von sehr einfachen Datensätzen, wie Kontaktsymbolen, deren Farbe über einen einstufigen Interaktionsdialog angepasst werden musste. Die Möglichkeiten zur Datenanzeige in einer stereoskopischen Lagedarstellung jedoch sind extrem vielfältig. Gerade die Experteninterviews haben gezeigt, welche Datensätze sinnvoll kombiniert werden können und welche Daten bereits in dreidimensionaler Form in eine Lagedarstellung integrierbar wären. Eine Erweiterung des Szenarios wie es aktuell in der stereoskopischen Lagedarstellung vorliegt, wäre die Kombination aus einer Mikro- und Makroansicht, mit der Beibehaltung des bereits implementierten Interaktionsparadigmas. Die Metapher der virtuellen Hand erlaubt neben einfachen Zeigebewegungen den Einsatz von Gesten, welche über verschiedene Handstellungen und Handbewegungen erfasst werden können. Die validierte Variante des Handmodells visualisiert ausreichend Information, um Handstellungen in der virtuellen Umgebung abzubilden. Damit könnte die virtuelle Umgebung mit einer Art „Workbench“ angereichert werden, aus der Werkzeuge zur Interaktion mit Datensätzen bereitgestellt werden, beispielsweise um dreidimensionale Datensätze zu analysieren. Über Greifgesten könnten Werkzeuge ausgewählt werden oder etwa Objekte aufgenommen und in der Lagedarstellung umgesetzt werden. Aus den Experteninterviews ergeben sich eine ganze Reihe weiterer Einsatzszenarien, die in der stereoskopischen Lagedarstellung Anwendung finden können. Jedoch sollte aus ergonomischer Sicht eine erneute Evaluierung der Belastung stattfinden, wenn weitere Szenarien in die Lagedarstellung implementiert werden. Da die „Mid Air“ Interaktion in der freien Luft stattfindet, und dem Nutzer daher jegliches haptisches Feedback fehlt, und es aus aktueller Sicht der Forschung noch keine adäquate Lösung für den Endnutzer und am Arbeitsplatz gibt, muss hierauf zwingend Rücksicht genommen werden.

Zum einen muss eine Lösung gefunden werden, um das Arbeiten mit virtuellen Daten „anfassbar“ zu machen, also haptisches Feedback bei Berührung von virtuellen Objekten an den Nutzer zurückzugeben. Mit einem solchen Feedback könnte die Anzahl von Fehlauflösungen möglicherweise reduziert werden, da der haptische Wahrnehmungskanal zusätzlich zum visuellen Kanal angesprochen und im menschlichen Gehirn gleichzeitig verarbeitet wird. Häufig werden auditive mit visuellen Rückmeldungen miteinander verknüpft, dies ist jedoch nicht für den Einsatz in jeder Umgebung zulässig oder gar möglich. Die Bereitstellung von haptischem Feedback in einer stereoskopischen Visualisierung mit versetzt gesteuertem Handmodell ist eine Herausforderung, wenn keine Datenhandschuhe oder Geräte eingesetzt werden sollen, welche im Sichtfeld störend sein könnten. Eine stereoskopische Visualisierung mit einer Desktopanzeige ist fast an jedem Arbeitsplatz einsetzbar, welcher sowieso über Bildschirmanzeigen verfügt, jedoch sind für entsprechende Arbeitsplätze Zusatzgeräte für ein mögliches haptisches Feedback in der Regel nicht vorgesehen und längst nicht serienreif. Als Alternative kann ein Anzeigemedium der erweiterten Realität zum Einsatz geprüft werden, mit der eine Verdeckung von eventuellen Geräten möglich wäre, welche das haptische Feedback in einem „Mid Air“-Interaktionskonzept ergänzen. Diese Geräte müssten jedoch sehr flexibel in ihren Freiheitsgraden und ihrer Geschwindigkeit sein und dürfen den Nutzer nicht bei der Arbeit behindern oder gar gefährden. Da inzwischen zumindest prototypische Hardware zur Verfügung steht, welche beispielsweise über geringe Distanz Druckluft an einen bestimmten Punkt im Raum abgeben kann, stehen somit auch Alternativen zur Verfügung, welche möglicherweise auch an einem räumlich eingeschränkten Arbeitsplatz einsetzbar sind, wie er in der vorliegenden Arbeit beschrieben und implementiert ist. Des weiteren bietet die in dieser Arbeit implementierte Testumgebung die Möglichkeit, weitere Test-Szenarien zu integrieren, welche auch sicherheits- bzw. zeitkritische Vorgänge abbilden. Mit der Ergänzung einer haptischen Komponente kann die Relevanz einer solchen für die Erfüllung der Arbeitsaufgabe überprüft und kritisch hinterfragt werden.

Literatur

- 9241-303, D. E. I. (2012). Ergonomie Der Mensch-System-Interaktion-Teil 303: Anforderungen an Elektronische Optische Anzeigen. *Beuth*.
- Adhikarla, V., Wozniak, P., Barsi, A., Singhal, D., Kovacs, P. & Balogh, T. (2014). Freehand Interaction with Large-Scale 3D Map Data. In *3DTV-Conference: The True Vision - Capture, Transmission and Display of 3D Video (3DTV-CON)*, 2014 (S. 1–4).
- Amthauer, R., Brocke, B., Liepmann, D. & Beauducel, A. (2001). Intelligenz-Struktur-Test 2000 R. *Göttingen: Hogrefe*, 2.
- Baier, A. & Zimmer, A. C. (2014). Advantages of Stereoscopic 3D Displays for Conflict Judgment Performance in Air-Traffic-Control: When and How to Use 3D. In *HCI International 2014-Posters' Extended Abstracts* (S. 609–614). Springer.
- Becker-Carus, C. & Herbring, H. (1997). *Allgemeine Psychologie*. Lit.
- Bell, D. G., Kuehnel, F., Maxwell, C., Kim, R., Kasraie, K., Gaskins, T., ... Coughlan, J. (2007). NASA World Wind: Opensource GIS for Mission Operations. In *Aerospace Conference, 2007 IEEE* (S. 1–9). IEEE.
- Blasch, E., Dorion, E., Valin, P. & Bossé, E. (2010). Ontology Alignment Using Relative Entropy for Semantic Uncertainty Analysis. In *Aerospace and Electronics Conference (NAECON), Proceedings of the IEEE 2010 National* (S. 140–148).
- Boll, P. (2015). Soscho...Vision in 3D. Das Volumendisplay "Der Bollograph".
- Borg, G., Maibaum, S., Braun, M. & Jagomast, K. K. (2001). Borg's Perceived Exertion and Pain Scales. *DEUTSCHE ZEITSCHRIFT FÜR SPORTMEDIZIN*, 52(9).
- Borg, G. A. (1982). Psychophysical Bases of Perceived Exertion. *Med sci sports exerc*, 14(5), 377–381.
- Bortz, J. (2013). *Statistik: Für Sozialwissenschaftler*. Springer-Verlag.
- Bortz, J. & Schuster, C. ([2010] 2010). *Statistik Für Human- Und Sozialwissenschaftler* (7., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage). Springer-Lehrbuch. XVI, 655 Seiten ; 27 cm : Illustrationen, Diagramme. Berlin: Springer.

- Botvinick, M. & Cohen, J. (1998). Rubber Hands ‘Feel’ Touch That Eyes See. *Nature*, 391(6669), 756–756.
- Bowman, D. A. (2013). 3D User Interfaces. *The Encyclopedia of Human-Computer Interaction*, 2nd Ed.
- Bowman, D. A. (2005). *3D user interfaces : theory and practice*. Boston [u.a.]: Addison-Wesley.
- Bowman, D. A. & Hodges, L. F. (1997). An Evaluation of Techniques for Grabbing and Manipulating Remote Objects in Immersive Virtual Environments. In *Proceedings of the 1997 Symposium on Interactive 3D Graphics* (35–ff.).
- Bowman, D. A., Coquillart, S., Froehlich, B., Hirose, M., Kitamura, Y., Kiyokawa, K. & Stuerzlinger, W. (2008). 3d User Interfaces: New Directions and Perspectives. *Computer Graphics and Applications, IEEE*, 28(6), 20–36.
- Bowman, D., Wingrave, C. et al. (2001). Design and Evaluation of Menu Systems for Immersive Virtual Environments. In *Virtual Reality, 2001. Proceedings. IEEE* (S. 149–156). IEEE.
- Brecher, C., Müller, S., Kuz, S. & Lohse, W. (2013). Towards Anthropomorphic Movements for Industrial Robots. In V. G. Duffy (Hrsg.), *Digital Human Modeling and Applications in Health, Safety, Ergonomics, and Risk Management. Human Body Modeling and Ergonomics* (S. 10–19). Springer Berlin Heidelberg.
- Broy, M. & Rausch, A. (2005). Das Neue V-Modell® Xt. *Informatik-Spektrum*, 28(3), 220–229.
- Bruder, G., Steinicke, F., Rothaus, K. & Hinrichs, K. (2009). Enhancing Presence in Head-Mounted Display Environments by Visual Body Feedback Using Head-Mounted Cameras. In *CyberWorlds, 2009. CW '09. International Conference On* (S. 43–50).
- Bruder, G., Steinicke, F. & Stuerzlinger, W. (2013). Touching the Void Revisited: Analyses of Touch Behavior on and above Tabletop Surfaces. In *IFIP Conference on Human-Computer Interaction* (S. 278–296). Springer.
- Bruder, G., Steinicke, F. & Sturzlinger, W. (2013). To Touch or Not to Touch?: Comparing 2D Touch and 3D Mid-Air Interaction on Stereoscopic Tabletop Surfaces. In *Proceedings of the 1st Symposium on Spatial User Interaction* (S. 9–16). ACM.
- Bruder, G., Steinicke, F. & Stürzlinger, W. (2013). Effects of Visual Conflicts on 3D Selection Task Performance in Stereoscopic Display Environments. In *Proceedings of IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI), IEEE Press* (S. 115–118).

- Brunner, A., Groebner, J., Umathum, R., Maier, F., Semmler, W. & Bock, M. (2014). An MR-Compatible Stereoscopic in-Room 3D Display for MR-Guided Interventions. *Magnetic Resonance Materials in Physics, Biology and Medicine*, 27(4), 277–282.
- Burdea, G. C. & Coiffet, P. (2003). *Virtual Reality Technology* (2. Aufl.). New York, NY, USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Butkiewicz, T. (2017). Designing Augmented Reality Marine Navigation Aids Using Virtual Reality. In *OCEANS 2017-Anchorage* (S. 1–9). IEEE.
- Butkiewicz, T. J. (2012). Exploring Ocean Flow Models with a Multitouch 3D Interface, 44–46.
- Callahan, J., Hopkins, D., Weiser, M. & Shneiderman, B. (1988). An Empirical Comparison of Pie vs. Linear Menus. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (S. 95–100). ACM.
- Card, S. K., English, W. K. & Burr, B. J. (1978). Evaluation of Mouse, Rate-Controlled Isometric Joystick, Step Keys, and Text Keys for Text Selection on a CRT. *Ergonomics*, 21(8), 601–613.
- Chen, H.-C., Yang, T.-H., Chen, C.-K., Chu, M.-T., Jou, I.-M., Su, F.-C. & Sun, Y.-N. (2014). Virtual Hand Modeling for Ultrasound-Guided Percutaneous Surgical Simulator. In *Healthcare Innovation Conference (HIC), 2014 IEEE* (S. 263–266).
- Das, K. & Borst, C. (2010). An Evaluation of Menu Properties and Pointing Techniques in a Projection-Based VR Environment. In *3D User Interfaces (3DUI), 2010 IEEE Symposium On* (S. 47–50).
- DIN EN ISO 9241-16. (1999). Ergonomische Anforderungen Für Bürotätigkeiten Mit Bildschirmgeräten, Teil 16: Dialogführung Mittels Direkter Manipulation.
- DIN EN ISO 9241-210. (2011). Ergonomische Anforderungen Der Mensch-System-Interaktion, Teil 210: Prozess Zur Gestaltung Gebrauchstauglicher Systeme. Beuth.
- DIN EN ISO 9241-420. (2011). *Ergonomie Der Mensch-System-Interaktion, Teil 420: Auswahlverfahren Für Physikalische Eingabegeräte*. Beuth.
- DIN EN ISO, 9.-1. (2008). 9241-110: Ergonomie Der Mensch-System-Interaktion, Teil 110: Grundsätze Der Dialoggestaltung. Berlin: Beuth.
- Dörner, R., Broll, W., Grimm, P. & Jung, B. (2016). Virtual Reality Und Augmented Reality (VR/AR). *Informatik-Spektrum*, 39(1), 30–37.

- Edwards, M. (1996). A Formative Model for Hand Input Devices in Virtual Environments or Haptic Manipulation. In *Computer-Human Interaction, 1996. Proceedings., Sixth Australian Conference On* (S. 312–313).
- Emmerich, W. (2000). Software Engineering and Middleware: A Roadmap. In *Proceedings of the Conference on The Future of Software Engineering* (S. 117–129). ACM.
- Endsley, M. R. (1988a). Design and Evaluation for Situation Awareness Enhancement. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (Bd. 32, S. 97–101). SAGE Publications.
- Endsley, M. R. (1988b). Design and Evaluation for Situation Awareness Enhancement. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (Bd. 32, S. 97–101). SAGE Publications.
- Endsley, M. R. (1995). Toward a Theory of Situation Awareness in Dynamic Systems. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 37(1), 32–64.
- Favreau, J., Djawadi, R. & Fergus, M. (2010). Iron Man 2. Concorde Home Entertainment.
- FEI/VSG. (2015). Open Inventor Framework. <http://www.openinventor.com/>.
- Ferrari, V., Megali, G., Troia, E., Pietrabissa, A. & Mosca, F. (2009). A 3-D Mixed-Reality System for Stereoscopic Visualization of Medical Dataset. *Biomedical Engineering, IEEE Transactions on*, 56(11), 2627–2633.
- Field, A. (2013). *Discovering Statistics Using IBM SPSS Statistics*. Sage.
- Fisher, P. & Unwin, D. (2003). *Virtual Reality in Geography*. CRC Press.
- 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.
- Fitts, P. M. & Peterson, J. R. (1964). Information Capacity of Discrete Motor Responses. *Journal of experimental psychology*, 67(2), 103.
- Fleishman, E. A. & Ellison, G. D. (1962). A Factor Analysis of Fine Manipulative Tests. *Journal of Applied Psychology*, 46(2), 96.
- Fleishman, E. A. & Hempel Jr, W. E. (1954). Changes in Factor Structure of a Complex Psychomotor Test as a Function of Practice. *Psychometrika*, 19(3), 239–252.
- Flemisch, F. O., Bengler, K., Bubb, H., Winner, H. & Bruder, R. (2014). Towards Cooperative Guidance and Control of Highly Automated Vehicles: H-Mode and Conduct-by-Wire. *Ergonomics*, 57(3), 343–360.

- Flemisch, F., Heesen, M., Hesse, T., Kelsch, J., Schieben, A. & Beller, J. (2012). Towards a Dynamic Balance between Humans and Automation: Authority, Ability, Responsibility and Control in Shared and Cooperative Control Situations. *Cognition, Technology & Work*, 14(1), 3–18.
- Flemisch, F., Kelsch, J., Löper, C., Schieben, A. & Schindler, J. (2008). Automation spectrum, inner/outer compatibility and other potentially useful human factors concepts for assistance and automation. *Human Factors for assistance and automation*, (2008), 1–16.
- Flick, U. (2010). *Qualitative Sozialforschung*.
- Ford, S. (2002). The First Three-Dimensional Nautical Chart. *Undersea with GIS*. ESRI Press, Redlands, CA, 117–138.
- Gittler, G. (1990). Dreidimensionaler Würfeltest.
- Göbel, M., Stallkamp, J. & Springer, J. (1994). 3-D Radar Display for Air-Traffic Control Tasks. In *Proceedings of the HFES European Chapter, Annual Meeting in Dortmund* (S. 57–66).
- Gold, C., Chau, M., Dzieszko, M. & Goralski, R. (2005). 3D Geographic Visualization: The Marine GIS. In *Developments in Spatial Data Handling* (S. 17–28). Springer.
- Gramann, K., Müller, H., Schönebeck, B. & Debus, G. (2006). The Neural Basis of Ego- and Allocentric Reference Frames in Spatial Navigation: Evidence from Spatio-Temporal Coupled Current Density Reconstruction. *Brain Research*, 1118(1), 116–129.
- Gramann, K., Müller, H. J., Eick, E.-M. & Schönebeck, B. (2005a). Evidence of Separable Spatial Representations in a Virtual Navigation Task. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 31(6), 1199.
- Gramann, K., Müller, H. J., Eick, E.-M. & Schönebeck, B. (2005b). Evidence of Separable Spatial Representations in a Virtual Navigation Task. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 31(6), 1199.
- Gramann, K., Onton, J., Riccobon, D., Mueller, H. J., Bardins, S. & Makeig, S. (2010). Human Brain Dynamics Accompanying Use of Egocentric and Allocentric Reference Frames during Navigation. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 22(12), 2836–2849.
- Gröger, G. & Plümer, L. (2012). Transaction Rules for Updating Surfaces in 3D GIS. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 69, 134–145.

- Grossman, T. & Balakrishnan, R. (2004). Pointing at Trivariate Targets in 3D Environments. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (S. 447–454).
- Grossman, T. & Balakrishnan, R. (2005). A Probabilistic Approach to Modeling Two-Dimensional Pointing. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction (TOCHI)*, 12(3), 435–459.
- Haberfellner, R., de Weck, O., Fricke, E. & Vössner, S. (2015). *Systems Engineering-Grundlagen Und Anwendung*. Orell Füssli.
- Hart, S. G. & Staveland, L. E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research. *Advances in psychology*, 52, 139–183.
- Helmholtz, H. (1864). Ueber den Horopter. *Albrecht von Graefes Archiv für Ophthalmologie*, 10(1), 1–60.
- Hincapié-Ramos, J. D., Guo, X., Moghadasian, P. & Irani, P. (2014). Consumed Endurance: A Metric to Quantify Arm Fatigue of Mid-Air Interactions. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (S. 1063–1072). ACM.
- Hoang, T. & Thomas, B. (2008). Augmented Reality In-Situ 3D Model Menu for Outdoors. In *Mixed and Augmented Reality, 2008. ISMAR 2008. 7th IEEE/ACM International Symposium On* (S. 185–186).
- Hoffman, D. M., Girshick, A. R., Akeley, K. & Banks, M. S. (2008). Vergence–Accommodation-Conflicts Hinder Visual Performance and Cause Visual Fatigue. *Journal of vision*, 8(3), 33.
- Hollands, J. G. & Wickens, C. D. (1999). *Engineering Psychology and Human Performance*. Prentice Hall New Jersey.
- Hugues, O., Cieutat, J.-M. & Guitton, P. (2010). An Experimental Augmented Reality Platform for Assisted Maritime Navigation. In *Proceedings of the 1st Augmented Human International Conference* (S. 12). ACM.
- Isenberg, P., Isenberg, T., Hesselmann, T., Lee, B., Von Zadow, U. & Tang, A. (2013). Data Visualization on Interactive Surfaces: A Research Agenda. *Computer Graphics and Applications, IEEE*, 33(2), 16–24.
- Jingtang, L., Gang, Z., Dunming, T. & Junjie, X. (2012). Real-Time Virtual Hand Controlling Using OpenSceneGraph. In *System Science, Engineering Design and*

- Manufacturing Informatization (ICSEM), 2012 3rd International Conference On* (Bd. 1, S. 264–268).
- Kennedy, R. S., Lane, N. E., Berbaum, K. S. & Lilienthal, M. G. (1993). Simulator Sickness Questionnaire: An Enhanced Method for Quantifying Simulator Sickness. *The international journal of aviation psychology*, 3(3), 203–220.
- Kokjer, K. J. (1987). The Information Capacity of the Human Fingertip. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 17(1), 100–102.
- Konrad, P. (2005a). EMG-Fibel: Eine Praxisorientierte Einführung in Die Kinesiologische Elektromyographie. Noraxon INC. USA.
- Konrad, P. (2005b). The Abc of Emg. *A practical introduction to kinesiological electromyography*, 1, 30–35.
- Kraak, M.-J. (2002). Current Trends in Visualization of Geospatial Data with Special Reference to Cartography. *Indian Cartographer*, 22, 319–324.
- Kramida, G. (2016). Resolving the Vergence-Accommodation Conflict in Head-Mounted Displays. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 22(7), 1912–1931.
- Kruse, J. (2015). *Qualitative Interviewforschung*.
- Kuz, S., Mayer, M. P., Müller, S. & Schlick, C. M. (2013). Using Anthropomorphism to Improve the Human-Machine Interaction in Industrial Environments (Part I). In V. G. Duffy (Hrsg.), *Digital Human Modeling and Applications in Health, Safety, Ergonomics, and Risk Management. Human Body Modeling and Ergonomics* (S. 76–85). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Kuz, S., Petruck, H., Heisterüber, M., Patel, H., Schumann, B., Schlick, C. M. & Binkofski, F. (2015). Mirror Neurons and Human-Robot Interaction in Assembly Cells. *Procedia Manufacturing*, 3, 402–408. 6th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics (AHFE 2015) and the Affiliated Conferences, AHFE 2015.
- Kuz, S., Schlick, C., Lindgaard, G. & Moore, D. (2015). Anthropomorphic Motion Control for Safe and Efficient Human-Robot Cooperation in Assembly System. In *Proceedings of the 19th Triennial Congress of the IEA* (Bd. 9, S. 14).
- Lambooij, M., Fortuin, M., Heynderickx, I. & IJsselstein, W. (2009). Visual Discomfort and Visual Fatigue of Stereoscopic Displays: A Review. *Journal of Imaging Science and Technology*, 53(3), 30201–1.

- Lane, R., Nevell, D., Hayward, S. & Beaney, T. (2010). Maritime Anomaly Detection and Threat Assessment. In *Information Fusion (FUSION), 2010 13th Conference On* (S. 1–8).
- LaViola, J. J. & Keefe, D. F. (2011). 3D Spatial Interaction: Applications for Art, Design, and Science. In *ACM Siggraph 2011 Courses* (S. 1). ACM.
- Leakey, L. S., Tobias, P. V. & Napier, J. R. (1964). A New Species of The Genus Homo From Olduvai Gorge. *Nature*, 202(4927), 7.
- Lin, B.-S., Lee, I.-J., Hsiao, P.-C., Yang, S.-Y. & Chou. (2014). Data Glove Embedded with 6-DOF Inertial Sensors for Hand Rehabilitation. In *Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing (IIH-MSP), 2014 Tenth International Conference On* (S. 25–28).
- Lipp, M. (2017). GIS2VR: From CityEngine via Unity to HTC Vive. www.esri.com/arcgis-blog/products/city-engine/3d-gis/gis2vr-from-cityengine-via-unity-to-htc-vive/.
- Lorenz, M., Busch, M., Rentzos, L., Tscheligi, M., Klimant, P. & Fröhlich, P. (2015). I'm There! The Influence of Virtual Reality and Mixed Reality Environments Combined with Two Different Navigation Methods on Presence. In *2015 IEEE Virtual Reality (VR)* (S. 223–224).
- Lu, G., Shark, L.-K., Hall, G. & Zeshan, U. (2012). Immersive Manipulation of Virtual Objects through Glove-Based Hand Gesture Interaction. *Virtual Reality*, 16(3), 243–252.
- Lubos, P., Bruder, G. & Steinicke, F. (2014). Analysis of Direct Selection in Head-Mounted Display Environments. In *3D User Interfaces (3DUI), 2014 IEEE Symposium On* (S. 11–18).
- MacKenzie, I. S. (1992). Fitts' Law as a Research and Design Tool in Human-Computer Interaction. *Human-computer interaction*, 7(1), 91–139.
- MacKenzie, I. S. & Buxton, W. (1992). Extending Fitts' Law to Two-Dimensional Tasks. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (S. 219–226). ACM.
- Marzke, M. W. & Marzke, R. F. (2000). Evolution of the Human Hand: Approaches to Acquiring, Analysing and Interpreting the Anatomical Evidence. *Journal of Anatomy*, 197(1), 121–140.
- Mascolo, T. G. C. (2005). Software Engineering and Middleware.
- Mayer, H. O. (2008). *Interview Und Schriftliche Befragung: Entwicklung, Durchführung Und Auswertung*. Oldenbourg Verlag.

- Mayer, H. O. (2012). *Interview Und Schriftliche Befragung: Grundlagen Und Methoden Empirischer Sozialforschung*. Oldenbourg Verlag.
- Megherbi, D. & Kim, M. (2015). A Collaborative Distributed Multi-Agent Reinforcement Learning Technique for Dynamic Agent Shortest Path Planning via Selected Sub-Goals in Complex Cluttered Environments. In *Cognitive Methods in Situation Awareness and Decision Support (CogSIMA), 2015 IEEE International Inter-Disciplinary Conference On* (S. 118–124).
- Mehrabi, M., Peek, E. M., Wuensche, B. C. & Lutteroth, C. (2013). Making 3D Work: A Classification of Visual Depth Cues, 3D Display Technologies and Their Applications. In *Proceedings of the Fourteenth Australasian User Interface Conference-Volume 139* (S. 91–100). Australian Computer Society, Inc.
- Mertens, A. (2019). Ergonomie Und Mensch-Maschine-Systeme. Vorlesung Lehreinheit 03:Menschliche Informationsverarbeitung I. Vorlesungsskript.
- Milgram, P. & Colquhoun, H. (1999). A Taxonomy of Real and Virtual World Display Integration. *Mixed reality: Merging real and virtual worlds*, 1, 1–26.
- Milgram, P. & Kishino, F. (1994). A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays. *IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems*, 77(12), 1321–1329.
- Napier, J. (1962). Fossil Hand Bones from Olduvai Gorge. *Nature*, 196(4853), 409.
- Neuwirth, W. & Benesch, M. (2004). Motorische Leistungsserie.
- Oh, H., Lee, S. & Bovik, A. C. (2016). Stereoscopic 3D Visual Discomfort Prediction: A Dynamic Accommodation and Vergence Interaction Model. *IEEE Transactions on Image Processing*, 25(2), 615–629.
- Pallotta, G., Vespe, M. & Bryan, K. (2013a). Traffic Knowledge Discovery from AIS Data. In *Information Fusion (FUSION), 2013 16th International Conference On* (S. 1996–2003).
- Pallotta, G., Vespe, M. & Bryan, K. (2013b). Traffic Route Extraction and Anomaly Detection (TREAD): Vessel Pattern Knowledge Discovery and Exploitation for Maritime Situational Awareness.
- Perani, D., Fazio, F., Borghese, N. A., Tettamanti, M., Ferrari, S., Decety, J. & Gilardi, M. C. (2001). Different Brain Correlates for Watching Real and Virtual Hand Actions. *NeuroImage*, 14(3), 749–758.
- Porathe, T. (2006). 3-D Nautical Charts and Safe Navigation.
- Poupyrev, I., Billingham, M., Weghorst, S. & Ichikawa, T. (1996). The Go-Go Interaction Technique: Non-Linear Mapping for Direct Manipulation in VR. In

- Proceedings of the 9th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology* (S. 79–80).
- Ray, C., Goralski, R., Claramunt, C. & Gold, C. (2011). Real-Time 3D Monitoring of Marine Navigation. In *Information Fusion and Geographic Information Systems* (S. 161–175). Springer.
- Reichelt, S., Häussler, R., Fütterer, G. & Leister, N. (2010). Depth Cues in Human Visual Perception and Their Realization in 3D Displays. In *SPIE Defense, Security, and Sensing* (76900B–76900B). International Society for Optics and Photonics.
- Ren, G. & O'Neill, E. (2012). 3D Marking Menu Selection with Freehand Gestures. In *3D User Interfaces (3DUI), 2012 IEEE Symposium On* (S. 61–68).
- Robertson, G., Czerwinski, M. & Van Dantzich, M. (1997). Immersion in Desktop Virtual Reality. In *Proceedings of the 10th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology* (S. 11–19).
- Rohmert, W. (1984). Das Belastungs-Beanspruchungs-Konzept. *Zeitschrift für arbeitswissenschaft*, 38(4), 193–200.
- Rossol, N., Cheng, I., Shen, R. & Basu, A. (2014). Touchfree Medical Interfaces. In *Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2014 36th Annual International Conference of the IEEE* (S. 6597–6600).
- Sander, U., Von Gross, F. & Hugger, K.-U. (2008). *Handbuch Medienpädagogik*. Springer.
- Schlick, C. M. (2016). Einführung in Die Arbeitswissenschaft. Vorlesung Lehrereinheit 11: Computergestützte Büroarbeit. Vorlesungsskript.
- Schlick, C., Luczak, H. & Bruder, R. (2010). *Arbeitswissenschaft*. Springer DE.
- Schmider, E., Ziegler, M., Danay, E., Beyer, L. & Bühner, M. (2010). Is It Really Robust? Reinvestigating the Robustness of ANOVA against Violations of the Normal Distribution Assumption. *Methodology: European Journal of Research Methods for the Behavioral and Social Sciences*, 6(4), 147.
- Schuhfried, G. (2009). Wiener Testsystem: Motorische Leistungsserie. *Vienna Reaction Unit, Basic Program. Development and production of scientific equipment*. Mödling, Austria.
- Schuler, D. & Namioka, A. (Hrsg.). (1993). *Participatory Design: Principles and Practices*. Participatory Design: Principles and Practices. Hillsdale, NJ, US: Lawrence Erlbaum Associates, Inc.

- Scott, S. D., Allavena, A., Cerar, K., Franck, G., Hazen, M., Shuter, T. & Colliver, C. (2010). Investigating Tabletop Interfaces to Support Collaborative Decision-Making in Maritime Operations. *Proceedings of ICCRTS*, 22–24.
- Shannon, C. E. (1949). WEAVER; W.(1949): The Mathematical Theory of Communication. *Urbana*.
- Smallman, H. S. & John, M. (2005). Naive Realism: Limits of Realism as a Display Principle. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (Bd. 49, S. 1564–1568).
- Stuerzlinger, W. & Teather, R. J. (2014). Considerations for Targets in 3D Pointing Experiments. In *Proceedings of HCI Korea* (S. 162–168). Hanbit Media, Inc.
- Sunnari, M., Arhippainen, L., Pakanen, M. & Hickey, S. (2012). Studying User Experiences of Autostereoscopic 3D Menu on Touch Screen Mobile Device. In *Proceedings of the 24th Australian Computer-Human Interaction Conference* (S. 558–561). ACM.
- Tbutkie's channel. (2013). 3D multi-touch ocean flow analysis demo [Video file]. Zugriff 1. Juli 2013 unter http://www.youtube.com/watch?v=S_gf29HaNM8
- Teather, R. J. & Stuerzlinger, W. (2011). Pointing at 3D Targets in a Stereo Head-Tracked Virtual Environment. In *3D User Interfaces (3DUI), 2011 IEEE Symposium On* (S. 87–94).
- Tenbrink, T. & Salwiczek, L. H. (2016). Orientation and Metacognition in Virtual Space. *Journal of experimental psychology: human perception and performance*, 42(5), 683.
- The Leap Motion Controller. (2015). Zugriff 14. Dezember 2015 unter <https://www.leapmotion.com>
- Thomas, L. C. & Wickens, C. D. (1999). Immersion and Battlefield Visualization: Frame of Reference Effects on Navigation Tasks and Cognitive Tunneling. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (Bd. 43, S. 153–157). SAGE Publications.
- Tukey, J. W. (1977). *Exploratory Data Analysis*. Addison-Wesley Series in Behavioral Science : Quantitative Methods. Reading, Mass. [u.a.]: Addison-Wesley.
- Urey, H., Chellappan, K. V., Erden, E. & Surman, P. (2011). State of the Art in Stereoscopic and Autostereoscopic Displays. *Proceedings of the IEEE*, 99(4), 540–555.

- Vasey, M. W. & Thayer, J. F. (1987). The Continuing Problem of False Positives in Repeated Measures ANOVA in Psychophysiology: A Multivariate Solution. *Psychophysiology*, 24(4), 479–486.
- Vetter, S. T. (2012). *Theoretische Und Experimentelle Analysen Zum Fitts\'schen Gesetz Bei Der Interaktion Mit Gro\ss Sflächigen Berührungssensitiven Bildschirmen* (Diss., Aachen, Techn. Univ., Diss., 2012).
- Wade, N. J. (2002). Charles Wheatstone (1802 – 1875). *Perception*, 31(3), 265–272.
- Wan, H., Chen, F. & Han, X. (2009). A 4-Layer Flexible Virtual Hand Model for Haptic Interaction. In *Virtual Environments, Human-Computer Interfaces and Measurements Systems, 2009. VECIMS '09. IEEE International Conference On* (S. 185–190).
- Weichert, F., Bachmann, D., Rudak, B. & Fisseler, D. (2013). Analysis of the Accuracy and Robustness of the Leap Motion Controller. *Sensors*, 13(5), 6380–6393.
- Welford, A. T. (1968). *Fundamentals of Skill / A.T. Welford*. Methuen London.
- Wickens, C. D., Vincow, M. & Yeh, M. (2005). *Design Applications of Visual Spatial Thinking: The Importance of Frame of Reference*. na.
- Wittmann, D., Baier, A., Neujahr, H., Petermeier, B., Sandl, P., Vernaleken, C. & Vogelmeier, L. (2011). *Development and Evaluation of Stereoscopic Situation Displays for Air Traffic Control*. Universitätsbibliothek Ilmenau.
- Yu, L.-J., Sun, D.-F., Peng, Z.-R. & Zhang, J. (2012). A Hybrid System of Expanding 2D GIS into 3D Space. *Cartography and Geographic Information Science*, 39(3), 140–153.
- Yuan, Y. & Steed, A. (2010). Is the Rubber Hand Illusion Induced by Immersive Virtual Reality? In *Virtual Reality Conference (VR), 2010 IEEE* (S. 95–102).
- Zeppenfeld, K. & Wolters, R. (2004). *Lehrbuch der Grafikprogrammierung: Grundlagen, Programmierung, Anwendung* (1. Aufl). Lehrbücher der Informatik. OCLC: 249129215. Heidelberg: Spektrum Akad. Verl.
- Zijlstra, F. R. H. (1993). *Efficiency in Work Behaviour: A Design Approach for Modern Tools*. TU Delft, Delft University of Technology.
- Zlatanova, S., Rahman, A. A. & Pilouk, M. (2002a). Trends in 3D GIS Development. *Journal of Geospatial Engineering*, 4(2), 71–80.
- Zlatanova, S., Rahman, A. & Pilouk, M. (2002b). 3D GIS: Current Status and Perspectives. *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34(4), 66–71.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Virtual-Reality-Kontinuum nach Milgram und Colquhoun (1999) . . .	10
2.2	Multiple Ressourcentheorie nach Hollands und Wickens (1999) aus Mertens (2019)	11
2.3	Querschnitt des menschlichen Auges (Schlick, Luczak & Bruder, 2010)	13
2.4	Spektrum der elektromagnetischen Strahlung nach Zeppenfeld und Wolters (2004)	13
2.5	Vergenzwinkel ϵ bei Betrachtung des Punktes P (aus Mertens, 2019) .	15
2.6	Umgekehrte Abbildung eines betrachteten Objektes auf der Retina und Darstellung der Kontraktion des Ziliarmuskels bei unterschiedlichen Gegstandsweiten (aus Mertens (2019))	16
2.7	Aufteilung der Tiefenhinweise nach Bowman (2005)	18
2.8	Darstellung des Horopters, auf dem die Fixationspunkte für die Tie- fenwahrnehmung liegen (vgl. Schlick (2016) und Helmholtz (1864)). .	20
2.9	Stereoskopische Parallaxe (aus Mertens (2019))	22
2.10	Illustration Konflikt zwischen Akkommodation und Vergenz nach Hoffman, Girshick, Akeley und Banks (2008) (angepasste Darstellung)	23
2.11	Konvergenzwinkel der Augen bei negativer Parallaxe (links), null- Parallaxe (Mitte) und positiver Parallaxe (rechts).	24
2.12	Modellhafte Darstellung des Situationsbewusstseins nach Endsley (1995)	26
2.13	Aufbau der reziproken Zeigeaufgabe nach Fitts (1954)	28
2.14	Ergebnisse der PET-Scans (links) von Versuchsteilnehmern bei der Betrachtung einer realen Hand und unterschiedlicher Handmodelle in der virtuellen Realität (rechts) (Perani et al., 2001)	33
2.15	Modelldarstellung der „Viewing Pipeline“ oder „Rendering Pipeline“ nach Zeppenfeld und Wolters (2004)	37
2.16	Rotatorisches 3D-Display mit einer Größe von 10"(Abbildung entnom- men aus Grossman und Balakrishnan (2004))	42

2.17	Nutzerabsicht zwischen Mensch und Computer bei Nutzereingabe nach Flemisch, Kelsch, Löper, Schieben und Schindler (2008), angepasste Darstellung	44
2.18	Ein- und Ausgabesysteme nach Schlick, Luczak und Bruder (2010, S. 971 FF.), erweiterte Darstellung	45
2.19	Klassifizierung von Auswahltechniken nach Aufgabeneinteilung nach Bowman (2005)	47
2.20	Manipulationsverfahren in virtuellen Umgebungen nach Bowman (2005)	49
2.21	Virtuix Omni Treadmill: Zweidimensionale Laufbandplattform zur Steigerung der Immersion und Fortbewegung in der Virtuellen Realität	53
2.22	ESRI ArcGIS GIS2VR: Virtueller Teleport durch eine virtuelle Stadt Lipp (2017)	53
2.23	GoGo-Interaktionstechnik nach Poupyrev, Billinghurst, Weghorst und Ichikawa (1996): Die Position der realen Hand ist durch Vektor $\bar{R}_r$ gekennzeichnet; die Position der virtuellen Hand durch $\bar{R}_v$	55
2.24	Auswahl Multivariater Ziele nach Stuerzlinger und Teather	58
2.25	„Pie Menu“-artiger Interaktionsdialog zur Analyse von Meeresströmungen mit einem berührungsempfindlichen Display (Tbutkie’s channel, 2013)	60
2.26	„Pie Menu“-artiger Interaktionsdialog in einer Multi-Touch-Umgebung zur Modellierung von Meeresströmungen	61
2.27	Hochaufgelöstes 3D-Bild aus Google Earth des Hauptsitzes der ATLAS ELEKTRONIK GmbH in Bremen	61
2.28	Fluglotsenarbeitsplatz mit stereoskopischer Visualisierung und Headtracking zur Anpassung der Perspektikve (aus Wittmann et al. (2011))	63
2.29	Dreidimensional visualisierte Einlaufstrecke für die Navigation durch sichere Gewässer mit angezeigter Einlaufstrecke, Bojen, etc. (Gold, Chau, Dziesko & Goralski, 2005)	65
2.30	Dreidimensionale Visualisierung von einem maritimen Einlaufszenario von Ray, Goralski, Claramunt und Gold (2011)	68
2.31	Hauptdarsteller aus „Iron Man 2“ interagiert intuitiv mit dreidimensionalem Hologramm (aus Favreau, Djawadi und Fergus (2010)) . . .	70
3.1	V-Modell XT nach Broy und Rausch (2005)	78

3.2	Systemschaubild des Gesamtsystems nach dem Vorbild von Haberfellner, de Weck, Fricke und Vössner (2015) mit Veranschaulichung der Subsysteme und deren Beziehungen und der durch die verfügbare Sensorik vorgegebene Systemgrenze (vgl. Haberfellner, de Weck, Fricke und Vössner (2015, S. 34-37))	83
3.3	Schematischer Aufbau des prototypischen Arbeitsplatzes zur „Mid Air“-Interaktion mit maritimen 3D-Daten(Meyer, Bützler, Dzaack & Schlick, 2014a)	84
3.4	Gestaltung des „Caraousel“-Dialogs auf mobilem Endgerät (Sunnari, Arhippainen, Pakanen & Hickey, 2012)	89
3.5	Vergleichendes Balkendiagramm der Zielpositionierungen vs. Ausführungszeit in Sekunden (vgl. Callahan, Hopkins, Weiser und Shneiderman (1988))	90
3.6	Interaktionsdialog als „Pie Menu“-Struktur und linearer Struktur in einer virtuellen Umgebung von Das und Borst (2010)	92
3.7	„Pie Menu“-Interaktion: Zunehmender Radius mit zunehmender Dialogtiefe	94
3.8	„Pie Menu“-Interaktion: Gleich bleibender Radius mit zunehmender Dialogtiefe	95
3.9	Interaktionsdialogvariante, bei der zwei Oberflächen nacheinander mit dem Interaktionsmedium durchschnitten werden müssen (Klassische „Drückbewegung“).	96
3.10	Interaktionsdialogvariante, bei der das Interaktionsmedium zwischen zwei Flächen hindurch bewegt werden muss.	97
3.11	Open Inventor: Architektur über einzelne Module	98
3.12	OIV Szenegraph	99
3.13	Anordnung Infrarotbeleuchtung und Infrarotkameras des Leap Motion Controllers (Weichert, Bachmann, Rudak und Fisseler (2013))	101
3.14	Leap Motion Controller ohne Abdeckung (Weichert, Bachmann, Rudak und Fisseler (2013))	102
3.15	Grundlagenschema zum Aufbau des Handmodells der Leap Motion („The Leap Motion Controller“, 2015).	103
3.16	Informationsfluss der prototypischen Software	104
3.17	Workflow der Umkonvertierung des Kartenmaterials	105

3.18	Oberes Bild: Handmodell als Interaktionsmedium zur Auswahl von Zielobjekt; Unteres Bild: Aktiviertes „Pie Menu“ an Zielobjekt	108
3.19	Kontext- und Lageansicht mit einer Punktwolke aus triangulierten Sonardaten in der stereoskopischen Lagedarstellung (vgl. Meyer und Dzaack (2015))	109
3.20	Ablauf eines Auswahl- und Statusänderungsprozesses für Kontakte auf der dreidimensionalen Seekarte	110
4.1	Darstellung der ausgewählten Muskeln zur physiologischen Betrachtung der muskulären Beanspruchung (nach Konrad (2005a), angepasste Darstellung)	121
4.2	Bestimmung der Objektgröße	123
4.3	Boxplot nach Tukey (1977)	125
4.4	Schematische Darstellung der Zeigebewegungen im dreidimensionalen Raum (vgl. Meyer, Bützler, Dzaack und Schlick (2016))	126
4.5	Darstellung der minimalistisch gestalteten virtuellen Handmodelle (vgl. Meyer, Bützler, Dzaack und Schlick (2016))	128
4.6	Screenshot der virtuellen Versuchsumgebung: Alle Zielobjekte gleichzeitig sichtbar	129
4.7	Screenshot der Umgebung mit virtuellen Zielobjekten, links: Leere Umgebung mit Hintergrundgradient; Mitte: Startobjekt aktiv; Rechts: Zielobjekt aktiv.	129
4.8	Schematischer Ablauf Versuchsreihe A	132
4.9	Verteilung der Zielobjekte auf die drei Tiefenebenen, die vom Nutzer stereoskopisch wahrgenommen werden	133
4.10	Ergebnisse der abhängigen Variable „Bewegungszeit“ zum Faktor „Handmodell“ mit den Visualisierungen M_1 , M_2 und M_3	142
4.11	Deskriptive Mittelwerte von Handmodell M_1 , M_2 und M_3	143
4.12	Linearer Zusammenhang zwischen Index of Difficulty und Bewegungszeit für Handmodelle $M_{1, 2, 3}$	144
4.13	Linearer Zusammenhang der Bewegungszeiten für Handmodelle M_1 , M_2 und M_3 der hinteren Tiefenebene	146
4.14	Linearer Zusammenhang der Bewegungszeiten für Handmodelle M_1 , M_2 und M_3 mittleren Tiefenebene	147

4.15	Linearer Zusammenhang der Bewegungszeiten für Handmodelle M_1 , M_2 und M_3 vorderen Tiefenebene	148
4.16	Ergebnisse der mentalen Belastung für die drei Handmodelle auf der RSME Skala	152
4.17	Deskriptive Analyse der physischen Beanspruchung mit der Borg-Skala	154
4.18	Boxplot der Ergebnisse für den „Simulator Sickness Questionnaire“ mit Daten aus Vorversuch als Baseline	156
4.19	Beispielhafte Darstellung: Allozentrische Anordnung der Dialogstruktur am Zielobjekt	165
4.20	Beispielhafte Darstellung: Egozentrische Anordnung der Dialogstruktur am Zielobjekt	166
4.21	Beispielsequenz für den Versuchsteilnehmern gezeigte Tunnel im „Tunnel Task“ nach Gramman. Links: Beginn des Tunnels (geradeaus); Mitte: Traverser Tunnelabschnitt (Nach rechts abbiegen); Rechts: Endabschnitt des Tunnels (Tenbrink & Salwiczek, 2016).	168
4.22	Klebefunkte für Hand, Arm und Rücken	168
4.23	Dialogkondition 1 - 1: Allozentrisch und schnelle Intersektion: „Quick Intersection Allozentrisch“	169
4.24	Dialogkondition 1 - 2: Egozentrisch und schnelle Intersektion: „Quick Intersection Egozentrisch“	170
4.25	Dialogkondition 2 - 1: Allozentrisch und langsame Intersektion „Slow Intersection Allozentrisch“	171
4.26	Dialogkondition 2 - 2: Egozentrisch und langsame Intersektion „Slow Intersection Egozentrisch“	172
4.27	Dialogkondition 3 - 1: Allozentrisch und Swipe Out Bewegung: „Swipe Out Allozentrisch“	173
4.28	Dialogkondition 3 - 2: Egozentrisch und Swipe Out Bewegung: „Swipe Out Egozentrisch“	174
4.29	Im Hauptversuch gewählte Positionen der Dialogkonditionen auf der stereoskopischen Seekarte	176
4.30	Versuchsleiterinterface in Versuchsreihe B	177
4.31	Darstellung des Ablaufplans von Versuchsreihe B	178

4.32	Boxplots mit 95%-CI der Ausführungszeit für die Faktorstufen „Quick Intersection“, „Slow Intersection“ und „Swipe Out“ des Faktors „Auslösung“	189
4.33	Boxplots mit 95%-CI der Ausführungszeit für die Faktorstufen „Allozentrisch“ und „Egozentrisch“ des Faktors „Ausrichtung“	190
4.34	Boxplots mit 95%-CI für die Fehlerrate mit Darstellung der Ausreißer	191
4.35	Boxplots mit 95%-CI der Fehlerrate für den Faktor „Ausrichtung“ . .	192
4.36	Boxplots mit 95%-CI der Fehlerrate für den Faktor „Auslösung“ . . .	192
4.37	Boxplots mit 95%-CI für den Faktor „Ausrichtung“	194
4.38	Boxplots mit 95%-CI für die Zeitliche Anforderung aus dem NASA TLX für den Faktor „Auslösung“	195
4.39	Boxplots mit 95%-CI für die Geistige Anforderung für den Faktor „Auslösung“	197
4.40	Boxplots mit 95%-CI der Leistung aus dem NASA TLX für den Faktor „Auslösung“.	198
4.41	Boxplots mit 95%-CI der „Frustration“ aus dem NASA TLX für den Faktor „Auslösung“.	200
4.42	Boxplots mit 95%-CI der Anstrengung aus dem NASA TLX für den Faktor „Auslösung“.	201
4.43	Boxplots mit 95%-CI der Anstrengung aus dem NASA TLX für den Faktor „Ausrichtung“.	202
4.44	Boxplots mit 95%-CI der Körperlichen Anforderung aus dem NASA TLX für den Faktor „Auslösung“.	204
4.45	Boxplots mit 95%-CI für die muskuläre Belastung des „Flexor Carpum Ulnaris“ Muskel.	205
4.46	Boxplots mit 95%-CI für die muskuläre Belastung des „Brachioradialis“ Muskel.	205

Tabellenverzeichnis

4.1	Zielgrößen der 15 kugelförmigen Ziele und nach Fitts berechneten Index of Difficulty (ID) in bits. Absolute Darstellungsgröße auf dem Versuchsmonitor in Millimetern sowie relativer Größe sowie Positionierung auf vorderer (1), mittlerer (2) sowie hinterer (3) Tiefenebene sind ebenfalls angegeben.	137
4.2	Deskriptive statistische Auswertung für die Bewegungszeit in Millisekunden für jedes der drei Handmodelle in den drei Tiefenebenen . . .	150
4.3	Deskriptive statistische Auswertung der Bewegungszeit in Millisekunden nach Tiefenebenen für jedes der drei Handmodelle.	151
4.4	Deskriptive Statistik für Borg RPE Skala nach Messzeitpunkt	153
4.5	Bivariate Korrelationsanalyse mit abhängigen Variablen aus Vortest (vgl. Meyer, Mertens, Dzaack und Schlick (2016a))	155
4.6	Deskriptive Ergebnisse des „Simulator Sickness Questionnaire“ im Vortest und während der Ausführung der Aufgaben mit Handmodell M ₁ , M ₂ und M ₃	155
4.7	Deskriptive Statistik der Fleishman-Faktoren (n=43)	186
4.8	Deskriptive Statistik der Würfeltest-Ergebnisse (n=43)	186
4.9	Deskriptive Statistik Zeit von Aufgabe bis Auslösung der Dialogkondition(n=42)	188
4.10	Deskriptive statistische Auswertung für die Fehlerrate der Versuchshauptaufgabe für Faktor „Auslösung“ x „Ausrichtung“	189
4.11	Deskriptive Statistik NASA TLX Zeitliche Anforderung (n=42)	193
4.12	Mittelwerte und Standardabweichungen für abhängige Variable Geistige Anforderung (n=43)	196
4.13	Mittelwerte und Standardabweichung für die subjektiv empfundene Leistung bei Ausführung der Versuchskonditionen (n=43)	198

4.14	Mittelwerte und Standardabweichung für die subjektiv empfundene Frustration bei Ausführung der Versuchskonditionen (n=43)	199
4.15	Mittelwerte und Standardabweichung für die subjektiv empfundene „Anstrengung“ bei Ausführung der Versuchskonditionen (n=43) . . .	201
4.16	Deskriptive Analyse der subjektiven „Körperlichen Anforderung“ aus dem NASA TLX Fragebogen (n=43)	203

Anhang

Zusammengefasste Ergebnisse der Experteninterviews: Auflistung der abgeleiteten Anforderungen

- Basisfunktionen einer Seekarte mit georeferenzierten, dynamischen Objekten soll vorhanden sein.
- Anzeige von dreidimensionalem Geländemodell.
- Stereoskopische Visualisierung unter Berücksichtigung ergonomischer Faktoren.
- Interaktive Schnittstelle, die gleichermaßen mit klassischer Mensch-Computer-Interaktion sowie mit dreidimensionaler, gestischer Eingabe möglich ist.
- Anzeige von Sensormaterial in der Kartenumgebung soll möglich sein.
- Darstellung der Wasser-Nullebene, die bei Bedarf in ihrer Visualisierung angepasst werden kann
- Funktionalität der Symbole für Über- und Unterwasserfahrzeuge, Symbole sollen veränderbar sein, Klassifikation von Kontakten soll anpassbar sein.
- Aussehen der Symbole soll dem NATO-Standard MIL-SYM-2525 entsprechen
- Die dreidimensionale Karte soll rotierbar sein.
- Symbole sollen über das Open Inventor Framework verwaltet werden können.
- Die Karte soll nahtlos translatierbar sein.
- Die Karte soll stufenlos vergrößert und verkleinert werden können.
- Auf der Karte sollen Objekte georeferenziert erstellt werden können.

- Eventuelle zukünftige Funktionalitäten die nicht Bestandteil des Projektes sind, sich aber gegebenenfalls auf die Systemarchitektur auswirken
- Interpolierte Sprünge zwischen Makro-Meso-Kosmos
- Bei Auswahl eines Objektes auf der Karte soll eine Zentrierung auf das Objekt bei gleichzeitigem interpoliertem Zoom erfolgen
- „Mapping“ georeferenzierter Unterwasserhöhendaten auf die Karte
- Definition des verwendeten Datenmaterials
- Hinzuladen von weiterem Datenmaterial, z.B. als Punktwolkemodell
- Daten Liegen als BMP-Dateien vor. Definition von Bounding-Box für Bitmaps erstellen.

Bestimmung und Verwendung des vorliegenden Formates für Höhendaten/Unterwasserdaten

- Projektion von Texturdaten auf Geländemodell (optional)

Welche Anpassungen werden dazu vorgenommen, es wird ein Modell zur Projektion benutzt.

- Höhendaten unter Wasser

Geländemodell wird aus ATLAS-internem Kartenmaterial erstellt

- Höhendaten über Wasser
- Möglichst den Standard verwenden, der hier schon existiert
- Taktische Symbole

Verwendung von allgemein-gültigem Standard als Vorgabe

- Lokaler Dienst der Bitmaps im MIL-STD-2525B generiert, also die Möglichkeit bietet, alle Symbole dynamisch bereit zu stellen.

Als Bitmaps von Webservice abrufen

- Evaluierung und Dokumentation der Softwarearchitektur der aktuellen Software als Basis für das Integrationskonzept

- Alles richtet sich nach Open Inventor Architektur (Szenegraph, OIV Datenbank)
- Software Integrationskonzept soll Anbindung an Kartenmaterial und Haus-interner Schnittstellen berücksichtigen.
- 2D Seekarten, Workflow für 3D-Seekarten notwendig
- 3D-Karte als Open Inventor Knoten integrierbar

Definition einer Referenzumgebung als Baustein für Gesamtprojekt zur Weiterverwendung

- Interaktion soll auf eine bestimmte Raumebene (x-z, x-y) sowohl bei der Translation als auch der Rotation und Skalierung mit bestimmten Handgesten und einfachen Greifbewegungen begrenzt werden können
- Interaktion findet im dreidimensionalen Raum statt. Wichtig
 - 3D Space Management soll in alle Richtungen erfolgen können (Translation, Rotation, Skalierung der Karte)
- Über Gestensteuerung den Wechsel zwischen verschiedenen Navigationsebenen bestimmen.
- Verschiedene Datensätze sollen miteinander kombiniert werden können und maßstabsgetreu abgebildet werden können.
- Navigation im Küstenbereich zur Darstellung von Höhenprofilen in flachen Gewässern.
- Planung und Simulation von Fahrmanövern im Flachwasser, Fjorden, dreidimensionale Darstellung ermöglicht eine bessere Übersicht.
- Bisherige Ansätze, wie aus maritimen Lagedarstellungen bekannt, wird von den Experten als bereits überzeugend empfunden.

Ansätze sollen genutzt werden und in Konzept einfließen

Anforderungen an die Darstellung von taktischen 3D Daten

- Spezielle Darstellung mit Umgebungs/Umweltinformationen, wie zum Beispiel Wind und andere Wetterdaten.
- Darstellung des Meeresbodens als dreidimensionales Höhenprofil.
- Darstellung der Wasseroberfläche sowie der Wassernulllinie.
- Darstellung der Bewegung und Bewegungsrichtung des eigenen Schiffes in Echtzeit.
- Darstellung von Daten, möglichst in Echtzeit von allen sich an Bord befindlichen Sensoren, dies können Radar- oder Sonarsensoren sein und sollen als Punktwolke oder abstrahiertes Volumen angezeigt werden.
- Anzeige von Tiefenkonturen oder Höhenprofil des Meeresbodens soll möglich sein.
- Beim Einsatz von Sonaren, beispielsweise auf Forschungsschiffen, ist die Anzeige Schallstrahlverlaufs als Volumenanzeige im dreidimensionalen System nützlich.
- Erstellung von Volumina oder Flächen zur Eingrenzung und Markierung von Regionen oder Suchgebieten, beispielsweise
- AUV Kontrolle und Darstellung
- Navigation
- Taktisches Verhalten, Vektoren

Zusammengefasste Ergebnisse der Experteninterviews: Anwendungsszenarien

Szenario 1 – Hafenschutz, Küstenschutz

Ziele

- Schutz vor Diebstahl

- Schutz vor Schmuggel/Drogenschmuggel
- Schutz der Infrastruktur
- Schutz vor Eindringlingen und Terrorangriffen
- Schutz vor illegaler Einwanderung

Akteure

- Zoll
- Grenzschutz
- Hafenpersonal
- Eigentümer
- Eindringline, Diebe
- Terroristen

Objekte

- Ladung
- Transporter
- Schiffe
- zu sichernde Flächen
- Grenzen bzw. Zäune

Sensoren

- Taucherdetektionssonare
- Kameras
- Infrarot, Nachtsicht
- Radare

- Proximity-Sensoren (Bewegungsmelder)
- 360 Grad Mikrofone
- Echtzeit-Satellitenbilder

Rettungs- bzw. Abwehrmaßnahmen

- Bodenpersonal
- Scheinwerfer
- Schallsignale

Visualisierung/Darstellung

- Stereoskopische 3D Lagedarstellung als Hauptbestandteil der Kommandozentrale
- Übertragung von preklassifizierten Sonardaten z.B. per UHF an Lagedarstellung
- Darstellung von eingehendem/ausgehendem Schiffsverkehr
- Positionsanzeigen sämtlicher Sensoren auf 3D-Lagekarte
- Abstrahierte Darstellung von Wetter (Windrichtung, mögliche zusätzliche Gefahren)

Interaktion

- Echtzeitanzeige von Sensordaten

Kameras

Ausrichtung auf 3D-Karte bzw. des Sichtkegels

Warnung bei Bewegungserfassung bzw. Objekterkennung

- Funkzentrale

Anzeige von Einsatzkräften auf 3D-Karte mit Echtzeitposition

Auswahl des Funkkontaktes auf stereoskopischer 3D-Karte

- Vergabe von Einsatzbefehlen über zentrales GIS
Markierung von Punkten auf Karte (zu denen Einsatzkräfte hinfahren/laufen sollen)
- Auswahl von Kontextinformation „vor Ort“, an bestimmten Punkten, in der Lagedarstellung
- Navigation in der Lagedarstellung

Szenario 2 – Windpark, Offshore

Ziele

- Permanente Überwachung eines Seegebietes
- Überwachung Überwasser und Unterwasser
- Informationsgewinnung über Lage
- Reaktion auf unvorhergesehene Situationen
- Wartungsaufgaben z.B. von Unterseekabeln
- Schutz vor Manipulation
- Wartung von Fundamenten
- Verhinderung von Vandalismus
- Eindringen von Unbefugten
- Reaktion und Schutz bei Unfällen in der Umgebung (Havarie Containerschiff)

Akteure

- Küstenwache
- Eigentümer
- Taucher (Ingenieure)
- Eindringline

- Saboteure
- Terroristen

Objekte

- Windräder
- Ölplattformen
- Grenzen
- Schutzzonen
- Boote
 - langsam
 - schnell

Sensoren

- Taucherdetektionssonare
- Kameras
- Infrarot, Nachtsicht
- Radare
- Echtzeit-Satellitenbilder
- Sonarbojen
- AUV's mit SONAR

Rettungs- bzw. Abwehrmaßnahmen

- Schall
- Licht
- Küstenwache/Einsatzboote
- Schleppkähne (bei Containerschiffhavarie z.B.)

Visualisierung/Darstellung

- Stereoskopische 3D Lagedarstellung als Hauptbestandteil der Kommandozen-
trale
- Übertragung von preklassifizierten Sonardaten von z.B. per UHF an Lagedar-
stellung
- Positionsanzeigen sämtlicher Sensoren auf 3D-Lagekarte
- Ausgabe der Sensordaten in der 3D-Karte (z.B. einfache Darstellung des Kame-
rabildes in das FOV der Kamera)
- Positionsanzeige von AUV's oder weiterer autonomer Fahrzeuge/Drohnen auf
Karte
- Abstrahierte Darstellung von Wetter (Windrichtung, mögliche zusätzliche Ge-
fahren)
- Positionen bzw. Zielpositionen der Akteure

Interaktionen

- Änderung der Ausrichtung von Sensoren, Kameras (besonders bei Ausfall)
- Auswahl von Kontextsensordaten über Interaktionsdialoges
- Echtzeitanzeige von Sensordaten
 - Kameras, Radare
 - Ausrichtung auf 3D-Karte bzw. des Sichtkegel per Geste/Zeigen
 - Warnung bei Bewegungserfassung bzw. Objekterkennung
- Zielpunktvergabe für ein AUV per Zeigegeste
- Zielpunktvergabe für Akteure
- Effektoren (nicht-letal)
 - Ausrichtung
 - Aktivierung
- Navigation in der Lagedarstellung

Zusammenfassung: Bathymetrie und Rohstoffsuche, Offshore und Hohe See

Ziele (Zusammenfassung)

- Offshore-Plattformsicherung
- Offshore-Erschließung
- Bergung von Altlasten in Meerestiefen
- Pipelineüberprüfung
 - Leckage klassifizieren und auf Karte markieren, Einsatzszenario
- Havarie Kreuzfahrtschiff
 - Darstellung taktischer Information auf stereoskopischer Karte konsolidieren
 - Bergung von Personen
 - Bergungsdaten/Positionen bereitstellen
 - Bergungsdaten/Positionen bereitstellen
- Havarie Flüchtlingsboot
 - Darstellung taktischer Information auf stereoskopischer Karte konsolidieren
 - Bergung von Personen
 - Bergungsdaten/Positionen bereitstellen
 - Bergungsdaten/Positionen bereitstellen
- Havarie Containerschiff
 - Verhinderung von Beschädigungen durch treibende Ladung
 - Bergung von Ladung
- Havarie Öltanker
 - Eindämmung von Kontamination
- Terrorabwehr

Akteure

- Küstenwache
Luft (Helikopter)
See
- Taucher
- Flüchtlinge
- Schiffbrüchige
- Rohstoffsuchende
- Rettungs-/Einsatzkräfte

Objekte

- Rohstofffelder
- Gefährliche Objekte
Minen
Chemikalien (Phosphor aus Munitionsresten)
Alt-Munition (z.B. Ostsee)
Fässer mit nuklearem Abfall (Meeresgrund)
- Unterwasserhindernisse
- Boote
- Schiffwracks
- Ölteppich
- Havarierte Container/Fracht

Sensoren

- Sonar, Echolot
- Taucherdetektionssonare
- Kameras
- Infrarotkameras
- Sonarbojen
- AUV's mit SONAR

Rettungs- bzw. Abwehrmaßnahmen

- Küstenwache/Einsatzboote
- Rettungsboote
- Eindämmung von Kontamination
 - Markierung von Flächen und Zonen per Geste
 - Klassifizierung von Flächen und Gefahren per Zeigegeste
- Orten auf Karte zur Positionsdatenbereitstellung
- Taucher

Visualisierung/Darstellung

- Stereoskopische 3D Lagedarstellung als Hauptbestandteil der Kommandozentrale
- Übertragung von preklassifizierten Sonardaten von z.B. per UHF an Lagedarstellung
- Positionsanzeigen sämtlicher Sensoren auf 3D-Lagekarte
- Ausgabe der Sensordaten in der 3D-Karte (z.B. einfache Darstellung des Kamerabildes in das FOV der Kamera)

- Positionsanzeige von AUV's oder weiterer autonomer Fahrzeuge/Drohnen auf Karte
- Abstrahierte Darstellung von Wetter (Windrichtung, mögliche zusätzliche Gefahren)
- Strömungsrichtungen darstellen (Containerhavarie)
- Positionen bzw. Zielpositionen der Akteure
- Darstellung von kontaminierten Gebieten

Interaktion

- Objektklassifizierung von „Neutral“ auf z.B. „Gefährlich“ per Interaktionsdialog
- Bodenprofilerstellung
 - Ausschnitte klassifizieren per Zeigegeste
- Bodenprofilerstellung und (Re-)Klassifikation
- Objektklassifizierung
 - von z.B. „Sekundär“ auf „Priorität“
 - Erstellung von Prioritätenliste (Wegpunkte)

Eingesetzte Fragebögen und Versuchsinstruktionen

Versuchsinstruktionen für die „Pie Menu“-Interaktion

Sie sehen nun vor sich eine dreidimensionale Seekarte. Durch die Stereo-Brille haben Sie die Möglichkeit, die Seekarte räumlich wahrzunehmen. Sobald Sie Geister- oder Doppelbilder sehen, melden Sie sich bitte sofort beim Versuchsleiter. Ihre Aufgabe besteht darin, mit einer virtuellen Hand virtuelle Symbole auf der dargestellten Seekarte auszuwählen. Dies geschieht durch die Annäherung des virtuellen Zeigefingers an das derzeit angezeigte Objekt. Sobald die Annäherung erfolgt, öffnet sich am Objekt ein Menü, welches Sie mit einer bestimmten Bewegung aktivieren können:

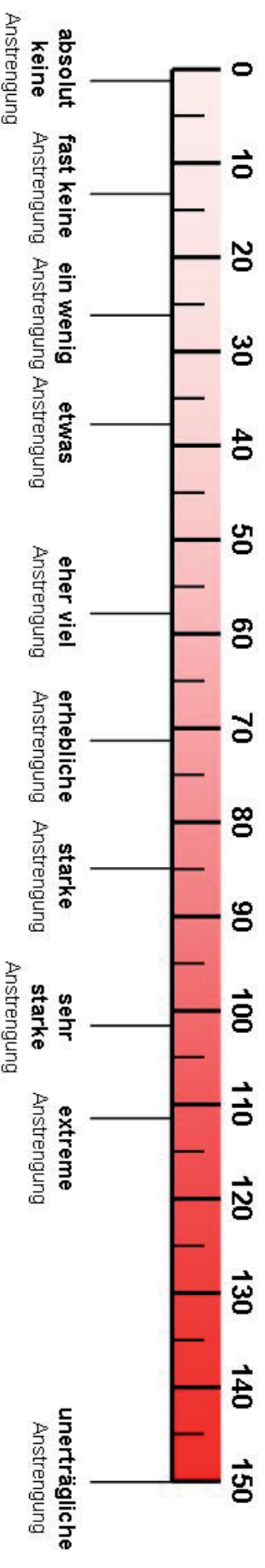
1. Sie bewegen die Zeigefingerspitze der virtuellen Hand von vorne mit einer schnellen Bewegung nach hinten durch das Menü hindurch. Wenn Sie eine bestimmte Geschwindigkeit erreichen, wird eine Auswahl getroffen.
2. Sie bewegen die Zeigefingerspitze der virtuellen Hand langsam von vorne nach hinten durch das Menü hindurch, dabei wird eine Auswahl getroffen.
3. Sie bewegen die Zeigefingerspitze von der Symbolmitte nach außen über das Menü heraus. Wenn Sie dabei das Menü treffen und eine bestimmte Geschwindigkeit erreichen, wird eine Auswahl getroffen.

Außerdem wird das Menü entweder über dem Symbol angezeigt oder in Bewegungsrichtung ihres Fingers. Welche der sechs dadurch entstehenden Möglichkeiten Sie anwenden sollen, wird Ihnen während des Versuchs in Form eines Plastikkärtchens vorgelegt (Kärtchen dem Probanden einmal kurz als Referenz zeigen). Rechts vorne auf der digitalen Seekarte befindet sich ein Symbol mit der entsprechenden Farbe, die Sie im Menü auswählen sollen. Bitte wählen Sie nach Möglichkeit immer die richtige Farbe aus. Wir werden nun mit einem Testlauf beginnen, in dem jede der oben genannten Möglichkeiten einmal ausprobiert werden kann. Während des Versuchs wird die Bewegungszeit ihrer Hand gemessen. Sie sollen also die entsprechende Farbe im Menü möglichst schnell und präzise nach der Auswahl des Objektes ausführen.

Viel Erfolg.

Handmodell: _____ VPNR: _____

Bitte geben Sie ihre subjektiv empfundene, mentale Beanspruchung an. Setzen Sie dazu eine Markierung auf der Skala.



VPNR:_____ Handmodell No.:_____

Bitte kreisen eine Zahl ein, um ihr subjektiv empfundenes, physisches Belastungsempfinden zu bewerten. Es ist nur eine Auswahl möglich.

RPE	Belastungsempfinden
6	
7	sehr sehr leicht
8	
9	sehr leicht
10	
11	leicht
12	
13	etwas anstrengend
14	
15	anstrengend
16	
17	sehr schwer
18	
19	sehr sehr schwer
20	zu stark, geht nicht mehr

Beanspruchungshöhe

Geben Sie jetzt für jede der unten stehenden Dimensionen an, wie hoch die Beanspruchung war. Markieren Sie dazu bitte auf den folgenden Skalen, in welchem Maße Sie sich in den sechs genannten Dimensionen von der Aufgabe beansprucht oder gefordert gesehen haben:

Beispiel:



Geistige Anforderungen

Wie viel geistige Anstrengung war bei der Informationsaufnahme und -verarbeitung erforderlich (z.B. Denken, Entscheiden, Rechnen, Erinnern, Hinsehen, Suchen...)? War die Aufgabe leicht oder anspruchsvoll, einfach oder komplex, erforderte sie hohe Genauigkeit oder war sie fehlertolerant?



Körperliche Anforderungen

Wie viel körperliche Aktivität war erforderlich (z.B. Ziehen, Drücken, Drehen, Steuern, Aktivieren,...)? War die Aufgabe leicht oder schwer, einfach oder anstrengend, erholsam oder mühselig?



Zeitliche Anforderungen

Wie viel Zeitdruck empfanden Sie hinsichtlich der Häufigkeit oder dem Takt, mit dem Aufgaben oder Aufgabenelemente auftraten? War die Abfolge langsam und geruhsam oder schnell und hektisch?



Leistung

Wie erfolgreich haben Sie Ihrer Meinung nach die vom Versuchsleiter (oder Ihnen selbst) gesetzten Ziele erreicht? Wie zufrieden waren Sie mit Ihrer Leistung bei der Verfolgung dieser Ziele?

**Anstrengung**

Wie hart mussten sie arbeiten, um Ihren Grad an Aufgabenerfüllung zu erreichen?

**Frustration**

Wie unsicher, entmutigt, irritiert, gestresst und verärgert (versus sicher, bestätigt, zufrieden, entspannt und zufrieden mit sich selbst) fühlten Sie sich während der Aufgabe?



Kontrollieren sie bitte, ob Sie zu allen Fragen Angaben gemacht haben. Bei Unklarheiten wenden Sie sich bitte an die Versuchsleiterin / den Versuchsleiter.

Subskalen:

Der Wert jeder Subskala ist ein Einzelmesswert. Je nach Fragestellung können Subskalen auch einzeln verwendet oder untereinander kombiniert werden.

Auswertung:

Jedem Kreuz wird ein ganzzahliger Wert von 0 bis 20 zugeordnet, wobei „0“ als gering und „20“ als hoch gewertet wird. Befindet sich ein Kreuz zwischen zwei Teilstrichen der Skala, wird derjenige ganzzahlige Wert vergeben, der sich näher am Kreuzungspunkt der Angabe des Teilnehmers befindet.

Quellen:

Hart, S. G. (2006). NASA-Task Load Index (NASA-TLX); 20 Years Later. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 50th Annual Meeting*, 904-908. Santa Monica: HFES.

Vortest

Bitte kreuzen Sie an, ob und wie stark die folgenden Symptome im Moment bei Ihnen ausgeprägt sind. Vielen Dank.

Symptome	gar nicht	leicht	mittel- mäßig	stark
allgemeines Unbehagen/ Unwohlsein	☐	☐	☐	☐
Ermüdung	☐	☐	☐	☐
Kopfschmerzen	☐	☐	☐	☐
überanstrengte Augen	☐	☐	☐	☐
Schwierigkeiten mit Sehschärfe	☐	☐	☐	☐
erhöhte Speichelbildung	☐	☐	☐	☐
Schwitzen	☐	☐	☐	☐
Übelkeit/ Erbrechen	☐	☐	☐	☐
Konzentrationsschwierigkeiten	☐	☐	☐	☐
Druckgefühl im Kopfbereich	☐	☐	☐	☐
verschwommene Sicht	☐	☐	☐	☐
Schwindel (bei geöffneten Augen)	☐	☐	☐	☐
Schwindel (bei geschlossenen Augen)	☐	☐	☐	☐
Gleichgewichtsstörungen	☐	☐	☐	☐
Magenbeschwerden	☐	☐	☐	☐
Aufstoßen	☐	☐	☐	☐