

**Auswahl von Selektions- und
Manipulationstechniken
für Virtual Reality-Anwendungen**

Matthias Weise

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften
(Dr.-Ing.)
in der Wissenschaftsdisziplin
"Komplexe Multimediale Anwendungsarchitekturen"

eingereicht an der
Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
Institut für Informatik und Computational Science
der Universität Potsdam

Ort und Tag der Disputation: Potsdam, den 20. Dezember 2021

Soweit nicht anders gekennzeichnet, ist dieses Werk unter einem Creative-Commons-Lizenzvertrag Namensnennung 4.0 lizenziert.

Dies gilt nicht für Zitate und Werke, die aufgrund einer anderen Erlaubnis genutzt werden. Um die Bedingungen der Lizenz einzusehen, folgen Sie bitte dem Hyperlink: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>

1. Gutachterin: Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrike Lucke
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Benjamin Weyers
3. Gutachterin: Prof. Dr.-Ing. Katrin Wolf

Online veröffentlicht auf dem

Publikationsserver der Universität Potsdam:

<https://doi.org/10.25932/publishup-53458>

<https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:kobv:517-opus4-534586>

Hiermit erkläre ich, dass ich die beigefügte Dissertation selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel genutzt habe. Alle wörtlich oder inhaltlich übernommenen Stellen habe ich als solche gekennzeichnet.

Ich versichere außerdem, dass ich die beigefügte Dissertation nur in diesem und keinem anderen Promotionsverfahren eingereicht habe und, dass diesem Promotionsverfahren keine endgültig gescheiterten Promotionsverfahren vorausgegangen sind.

Matthias Weise

Zusammenfassung

Die stetige Weiterentwicklung von VR-Systemen bietet neue Möglichkeiten der Interaktion mit virtuellen Objekten im dreidimensionalen Raum, stellt Entwickelnde von VR-Anwendungen aber auch vor neue Herausforderungen. Selektions- und Manipulationstechniken müssen unter Berücksichtigung des Anwendungsszenarios, der Zielgruppe und der zur Verfügung stehenden Ein- und Ausgabegeräte ausgewählt werden. Diese Arbeit leistet einen Beitrag dazu, die Auswahl von passenden Interaktionstechniken zu unterstützen. Hierfür wurde eine repräsentative Menge von Selektions- und Manipulationstechniken untersucht und, unter Berücksichtigung existierender Klassifikationssysteme, eine Taxonomie entwickelt, die die Analyse der Techniken hinsichtlich interaktionsrelevanter Eigenschaften ermöglicht. Auf Basis dieser Taxonomie wurden Techniken ausgewählt, die in einer explorativen Studie verglichen wurden, um Rückschlüsse auf die Dimensionen der Taxonomie zu ziehen und neue Indizien für Vor- und Nachteile der Techniken in spezifischen Anwendungsszenarien zu generieren. Die Ergebnisse der Arbeit münden in eine Webanwendung, die Entwickelnde von VR-Anwendungen gezielt dabei unterstützt, passende Selektions- und Manipulationstechniken für ein Anwendungsszenario auszuwählen, indem Techniken auf Basis der Taxonomie gefiltert und unter Verwendung der Resultate aus der Studie sortiert werden können.

Abstract

The constant advancement of VR systems offers new possibilities of interaction with virtual objects in three-dimensional space, but also poses new challenges for developers of VR applications. Selection and manipulation techniques have to be chosen in dependence of the application scenario, the users and the available input and output devices. This work contributes to support the selection of suitable interaction techniques. A representative quantity of selection and manipulation techniques has been investigated and a taxonomy has been developed based on existing classification systems which allows the analysis of the techniques with respect to properties relevant for interaction. Based on this taxonomy, techniques were selected and compared in an exploratory study in order to draw conclusions about the dimensions of the taxonomy and to generate new evidence for advantages and disadvantages of the techniques in specific application scenarios. The results of the work lead to a web application, which supports the developer of VR applications in choosing suitable selection and manipulation techniques for an application scenario by filtering techniques based on the taxonomy and sorting them using the results of the study.

Danksagung

Großen Dank gebührt zu allererst meiner Doktormutter und Chefin Prof. Dr. Ulrike Lucke, die es geschafft hat, eine familiäre und produktive Atmosphäre für das Promovieren und Arbeiten am Lehrstuhl zu schaffen. Ohne ihre vielen menschlichen und fachlichen Ratschläge und die gewährten Freiheiten wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Weiterhin gilt mein Dank Prof. Dr. Benjamin Weyers und Prof. Dr. Katrin Wolf für ihr Interesse an meiner Arbeit sowie die wertvollen Diskussionen und Anregungen im Vorfeld.

Einen wesentlichen Anteil am Gelingen dieser Arbeit trägt mein Mentor Dr. Raphael Zender, der immer ein offenes Ohr hatte und mir einen wertvollen fachlichen Austausch ermöglichte. Sein unerschütterliches Vertrauen in meine Arbeit bestärkte mich in meinen Vorhaben. Zudem wusste er mich stets zu motivieren und zu inspirieren.

Diese Dissertation entstand während meiner Anstellung am Lehrstuhl für Komplexe Multimediale Anwendungsarchitekturen der Universität Potsdam. Ich möchte mich bei allen Mitgliedern des Lehrstuhls für den regen fachlichen Austausch und die vielen spaßigen Stunden bedanken. Auch die Arbeitskollegen aus den Projekten eLiS (E-Learning in Studienbereichen) und HandLeVR (Handlungsorientiertes Lernen in der VR Lackierwerkstatt) hatten einen großen Einfluss auf meinen wissenschaftlichen Werdegang. Insbesondere gilt mein Dank Dr. Sven Strickroth, der mir bei der Gestaltung der Studie mit vielen Ratschlägen zur Seite stand. Auch möchte ich Hendrik Geßner, Jan Bernoth, Julian Dehne, Axel Wiepke und Alexander Kiy für die fachlichen Diskussionen und Hilfestellungen, aber auch für die nötige Ablenkung in den vergangenen Jahren danken. Dr. Lena Florian danke ich für die wertvollen Hinweise zur Arbeit und die spannenden Diskussionen, die oft neue Perspektiven eröffneten.

Mein Dank gilt auch den zahlreichen Freiwilligen, die an der Studie teilgenommen und diese so überhaupt erst möglich gemacht haben.

Meinen Eltern bin ich sehr dankbar für die schöne und behütete Kindheit und die vermittelten Werte. Dadurch haben sie meinen Lebensweg stark geprägt und mich an diesen Punkt meines Lebens geführt. Ich danke auch meinen Freunden für den Rückhalt und die schöne Freizeitgestaltung in den letzten Jahren.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Forschungsfragen	4
1.3	Methodisches Vorgehen und Aufbau der Arbeit	5
1.4	Abgrenzung	6
1.4.1	Interaktion im 3D-Raum	7
1.4.2	Aufgabentypen	8
1.4.3	Spezielle Eingabegeräte	9
1.4.4	Ausgabegeräte	9
1.4.5	Kollaborative Interaktion	10
1.4.6	Interaktion mit mehreren Objekten	11
1.4.7	2D-GUIs und Widgets	11
1.5	Eigene Vorarbeiten	12
2	Grundlagen und verwandte Arbeiten	14
2.1	Grundlegende Konzepte der 3D-Interaktion	15
2.1.1	Motorische Steuerung	15
2.1.2	Modell zur Interaktion in VR-Umgebungen	15
2.1.3	Fitts' Law	16
2.1.4	Speed-Accuracy Tradeoff	17
2.1.5	Optimized Initial Impulse Model	17
2.2	Einflussfaktoren auf die Eignung von Interaktionstechniken	18
2.2.1	Nutzende	18
2.2.2	Ein- und Ausgabegeräte	21
2.2.3	Interaktionstechnik	22
2.2.4	VR-Anwendung	24
2.3	Kriterien für die Eignung von Interaktionstechniken	26
2.3.1	Usability	26
2.3.2	User Experience	29
2.4	Verwandte Arbeiten	29
2.4.1	Klassifikationen und Taxonomien	30
2.4.2	Existierende Unterstützungen für die Auswahl von Interaktionstechniken	31
3	Klassifikation von Interaktionstechniken	38
3.1	Vorgehen	39
3.2	Dimensionen der Taxonomie	41
3.2.1	Metapher	41
3.2.2	Durchführbare Aufgaben	48

3.2.3	Anforderungen an Eingabegeräte	49
3.2.4	Reichweite	52
3.2.5	Zweihändige Interaktion	52
3.2.6	Abbildungsfunktion	53
3.2.7	Separierung der Transformationen	56
3.2.8	Terminierung der Interaktion	57
3.2.9	Visuelles Feedback	58
3.2.10	Disambiguierung	60
3.2.11	Constraints	62
3.2.12	Interaction Fidelity	63
3.3	Diskussion	64
3.3.1	Validität der Taxonomie	64
3.3.2	Kritik an FIFA	65
3.3.3	Nicht genutzte Dimensionen	67
4	Evaluation ausgewählter Interaktionstechniken	70
4.1	Motivation	70
4.2	Ausgewählte Interaktionstechniken	72
4.3	Studienaufbau	83
4.3.1	Reale und virtuelle Testumgebung	84
4.3.2	Aufgaben	84
4.3.3	Design	86
4.3.4	Kompromiss zwischen Geschwindigkeit und Präzision	89
4.4	Ablauf der Studie	89
4.5	Ergebnisse	90
4.5.1	Selektion	93
4.5.2	Manipulation	105
4.6	Diskussion	123
4.6.1	Disambiguierung	123
4.6.2	Separierung der Transformationen	124
4.6.3	Scaled HOMER (+ Scale)	126
4.6.4	Selektionsmechanismus	127
4.6.5	Buttons	128
4.6.6	Scaled Scrolling World In Miniature + Scale	128
4.6.7	Abbildungsfunktion	129
4.6.8	Natürlichkeit und Interaction Fidelity	131
4.6.9	Einfluss der Metapher	132
4.6.10	Einhändigkeit vs. Zweihändigkeit	134
4.6.11	Kritische Betrachtung der Studie	134
4.7	Zusammenfassung der Erkenntnisse und Hypothesengenerierung	136
4.7.1	Unterstützende Ergebnisse	136
4.7.2	Hypothesengenerierung	140
4.7.3	Schlussfolgerung	146
5	Webbasiertes Unterstützungssystem und weitere Ergebnisse	147
5.1	S3DIT	147
5.1.1	Filtern der Techniken	149
5.1.2	Detailansicht	150
5.1.3	Sortieren der Techniken	151
5.1.4	Weitere Funktionen	152

5.2	Automatische Aufgabengenerierung	152
5.3	Zugang zu Software und Daten	154
6	Zusammenfassung und Ausblick	155
6.1	Zusammenfassung	155
6.2	Ausblick	157
	Literaturverzeichnis	176
	Anhang	181
A.1	Vollständige Taxonomie	182
A.2	Ausgewählte Interaktionstechniken	183
A.3	Dokumente Selektionsstudie	185
A.4	Dokumente Manipulationsstudie	188
A.5	Erklärung Interaktionstechniken	191
A.6	Fragebögen	192
A.7	Diagramme Motion Sickness	200
A.8	Mittelwerte	201
A.8.1	Selektion	201
A.8.2	Manipulation	203
A.9	Korrelationen	208
A.9.1	Fragebögen	208
A.9.2	Selektion	210
A.9.3	Manipulation	214

Kapitel 1

Einleitung

Virtual Reality (VR) hat im Laufe der letzten Jahre stetig an Relevanz gewonnen und bereits Einzug in viele verschiedene Anwendungsbereiche gefunden. So kann VR z.B. für das Lehren und Lernen genutzt werden, die Visualisierung von Daten unterstützen oder der Unterhaltung dienen. Bei den Umsetzungen entsprechender VR-Anwendungen spielt insbesondere die Gestaltung der Interaktion in der virtuellen Umgebung eine tragende Rolle. Dabei stehen Entwickelnde vor einer Vielzahl von Herausforderungen. Welche Arten der Interaktion existieren und sind umsetzbar? Wie können die Möglichkeiten der Virtualität genutzt werden, ohne die Anwendenden zu überfordern? Welche Anforderungen stellen die Nutzenden, die Anwendungsszenarien oder die nutzbaren Eingabegeräte an die umzusetzenden Eingabeformen?

1.1 Motivation

The ultimate display would, of course, be a room within which the computer can control the existence of matter. A chair displayed in such a room would be good enough to sit in. Handcuffs displayed in such a room would be confining, and a bullet displayed in such a room would be fatal. With appropriate programming such a display could literally be the Wonderland into which Alice walked.

Mit diesen Worten beschrieb Ivan E. Sutherland 1965 seine Vorstellung des „Ultimate Display“ (Sutherland, 1965) und legte damit den theoretischen Grundstein für Virtual Reality. Diese ermöglicht es durch entsprechende Ein- und Ausgabegeräte eine computergenerierte digitale Umgebung zu erleben und mit dieser zu interagieren, als wenn die Umgebung real wäre (Jerald, 2016). Insbesondere in den letzten Jahren hat sich die Technologie, die VR-Anwendungen so immersiv erlebbar macht, enorm weiterentwickelt und viele Ein- und Ausgabegeräte kamen auf dem Markt, die VR auch für die breite Masse zugänglich machten. Dieser technologische Fortschritt ermöglicht auch neue Formen der Interaktion im virtuellen dreidimensionalen Raum, die sinnvoll in die Anwendungen integriert werden müssen.

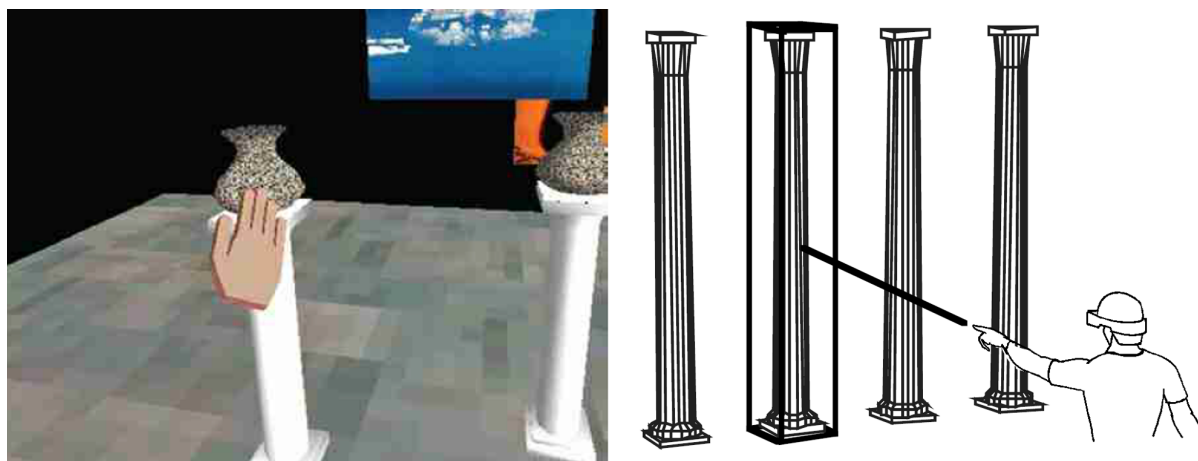


Abbildung 1.1: Oft verwendete Selektions- und Manipulationstechniken. *Links: Simple Virtual Hand* (Poupyrev et al., 1996). *Rechts: Ray-Casting* (Mine, 1995a).

Nach LaViola et al. (2017) wird 3D-Interaktion wie folgt definiert:

[A] Human-computer interaction in which the user's tasks are performed directly in a real or virtual 3D spatial context. Interactive systems that display 3D graphics do not necessarily involve 3D interaction; for example, if a user tours a model of a building on her desktop computer by choosing viewpoints from a traditional menu, no 3D interaction has taken place. On the other hand, 3D interaction does not necessarily mean that 3D input devices are used; for example, in the same application, if the user clicks on a target object to navigate to that object, then the 2D mouse input has been directly translated into a 3D virtual location; we consider this to be a form of 3D interaction.

Bei der 3D-Interaktion werden demnach Aktionen im realen und/oder virtuellen dreidimensionalen Raum durchgeführt. Ein Großteil der von VR-Systemen erzeugten Immersion basiert auf der Erfassung von Bewegungen der Nutzenden in der Realität, weshalb in dieser Arbeit Aktionen im realen 3D-Raum, die in die virtuelle Welt übertragen werden, im Fokus stehen. Dies wird auch oft als räumliche Eingabe bezeichnet (Hinckley et al., 1994). Eine zentrale Komponente der 3D-Interaktion sind 3D-Interaktionstechniken (im Folgenden auch nur Interaktionstechniken oder Techniken genannt). Diese übertragen die erfassten Informationen der Eingabegeräte auf Aktionen bzw. Bewegungen in der dreidimensionalen virtuellen Umgebung und geben die Auswirkungen in Form von Feedback an die Nutzenden zurück (LaViola et al., 2017). Zwei häufig genutzte Techniken sind *Virtual Hand* und *Ray-Casting* (siehe Abbildung 1.1). Bei der *Virtual Hand* Technik werden Bewegungen der echten Hand auf einen virtuellen Stellvertreter übertragen. Dadurch kann man sehr natürlich mit Objekten im Aktionsradius interagieren. *Ray-Casting* ermöglicht die Auswahl von Objekten, auch auf größere Distanz, durch einen Lichtstrahl, der von der Hand ausgeht (Mine, 1995a). Diese Techniken dienen in erster Linie der Manipulation und Selektion von virtuellen Objekten. Auch andere Aufgaben können durch Interaktionstechniken durchgeführt werden, wie z.B. die Fortbewegung in der virtuellen Welt (siehe z.B. Boletsis (2017)). In dieser Arbeit stehen allerdings Selektions- und Manipulationstechniken im Fokus.

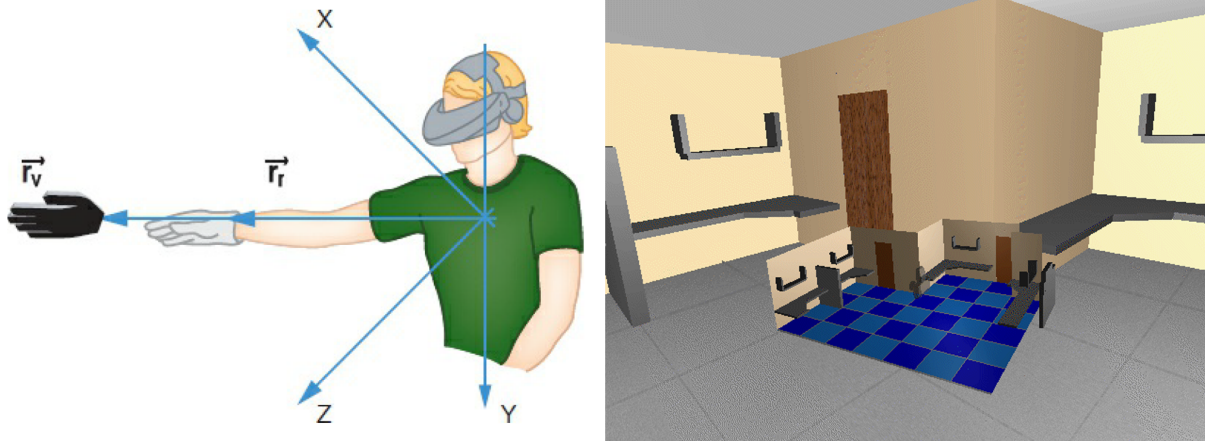


Abbildung 1.2: Weitere Selektions- und Manipulationstechniken. *Links: Go-Go* (Poupyrev et al., 1996). *Rechts: World In Miniature* (Stoakley et al., 1995).

Maus und Tastatur zusammen mit dem WIMP Paradigma (Windows, Icons, Menus, Pointer) (van Dam, 1997) sind schon lange Standard bei der Bedienung von zweidimensionalen Oberflächen (Dang, 2007). Für die 3D-Interaktion fehlen diese Standards aber, nicht zuletzt aufgrund der stetigen Weiterentwicklung von entsprechenden Ein- und Ausgabegeräten. Zwar werden oft simple Techniken, wie die genannte *Virtual Hand* oder *Ray-Casting*, verwendet, dies liegt aber vor allem daran, dass sie leicht zu implementieren, intuitiv nutzbar und aufgrund ihrer Elementarität meist ausgiebig getestet und beschrieben wurden (LaViola et al., 2017; Wingrave, 2009). Die Interaktion mit z.B. kleinen, entfernten oder verdeckten Objekten ist mit diesen Techniken dagegen nur schwer oder gar nicht möglich (Dang, 2007; LaViola et al., 2017). Anwendungsszenarien von dreidimensionalen virtuellen Welten können sehr vielfältig sein und ob eine Interaktionstechnik geeignet ist, hängt stark von den Ein- und Ausgabegeräten, den Nutzenden, den durchzuführenden Aufgaben und den Eigenschaften der virtuellen Umgebung ab (Poupyrev et al., 1997). Um den verschiedenen Anforderungen zu genügen, wurde bereits eine Vielzahl weiterer Techniken entwickelt. Insbesondere Ende des 20. Jahrhunderts wurde viel im Bereich der 3D-Interaktion geforscht und eine große Anzahl neuartiger Techniken entwickelt (Poupyrev & Kruijff, 2000). Die *Go-Go* Technik (Poupyrev et al., 1996) ermöglicht z.B. die virtuelle Verlängerung des Arms, und *World In Miniature* (Stoakley et al., 1995) erlaubt die Interaktion mit Stellvertreterobjekten in einem Miniaturmodell. So wird auch die Manipulation von Objekten außerhalb der Armreichweite unterstützt. Beide Techniken sind in Abbildung 1.2 dargestellt. Anfang des Jahrhunderts gingen die Bemühungen in diesem Forschungsbereich stark zurück, was Bowman et al. (2006) darauf zurückführen, dass der Gestaltungsraum der Techniken auf einem groben Level abgedeckt wurde. Dennoch gewährleisteten Interaktionstechniken in vielen Szenarien noch keine ausreichende Nutzbarkeit und insbesondere durch die Erweiterung und Anpassung bestehender Techniken gibt es Potenzial für Verbesserungen (Wingrave, 2009).

Noch sind wir weit von der einstigen Vision Sutherlands entfernt, aber in den letzten Jahren lösten neuartige Ein- und Ausgabegeräte, wie die Oculus Rift¹, die HTC Vive²

¹<https://oculus.com/rift>, letzter Abruf 21.02.2021

²<https://vive.com>, letzter Abruf 21.02.2021

oder die Leap Motion³, einen neuen Hype um VR aus. Damit einhergehend wurde auch das Forschungsfeld um die 3D-Interaktion wieder aktiver und eine Vielzahl neuer Techniken wurde entwickelt (Moore et al., 2018; Ramcharitar & Teather, 2018; Zielasko et al., 2018). Diese verbessern beispielsweise die Interaktion mit kleinen oder nah beieinander liegenden Objekten. Wie aus dem Interaktionsdesign bekannt, kann es trotz vieler neuer Entwicklungen keine Interaktionstechnik geben, die perfekt für alle möglichen Anwendungsszenarien geeignet ist (Bowman, Kruijff et al., 2001; LaViola et al., 2017; Wingrave & Bowman, 2005). Viele Studien haben gezeigt, dass die Performance einer Technik von unterschiedlichen Faktoren, wie den durchzuführenden Aufgaben, der virtuellen Umgebung und den Nutzenden, abhängig ist (siehe z.B. Poupyrev et al. (1998); Vanacken et al. (2007); Wingrave et al. (2005)).

1.2 Forschungsfragen

Entwickelnde von Anwendungen, die 3D-Interaktion nutzen, stehen somit vor der Herausforderung, die passenden Techniken für die jeweiligen Anwendungsszenarien zu identifizieren. Um dies zu ermöglichen, müssen die Vor- und Nachteile der Techniken herausgestellt (Bowman, Kruijff et al., 2001) und die Sichtbarkeit der Ergebnisse in diesem Forschungsbereich erhöht werden, indem sie in einer zugänglichen Form dargestellt werden. Die Erkenntnisse im Bereich der 3D-Interaktion sind über viele Arbeiten verteilt, terminologisch divers, und Interessierten wird so ein tieferer Einblick erschwert (Hinckley et al., 1994). Diese Arbeit hat zum Ziel, existierende Interaktionstechniken in einer strukturierten Form erfassbar zu machen und eine initiale Abschätzung von Vor- und Nachteilen verschiedener Techniken zu ermöglichen. Entsprechend steht folgende zentrale Fragestellung im Fokus dieser Arbeit:

Wie kann die Auswahl von Selektions- und Manipulationstechniken für VR-Anwendungen unterstützt werden?

Selektions- und Manipulationstechniken wurden meist für spezifische Anwendungsszenarien entwickelt und unterscheiden sich entsprechend in einer Vielzahl von Eigenschaften. So setzen einige Techniken z.B. verschiedene Eingabegeräte voraus, ermöglichen die Interaktion auf unterschiedliche Distanzen oder verwenden verschiedene Feedback-Mechanismen. Dies gilt es bei der Beantwortung der Forschungsfrage zu beachten. Aus diesem Grund stehen folgende drei Teilfragestellungen in dieser Arbeit im Fokus:

1. Welche Eigenschaften von Selektions- und Manipulationstechniken erlauben die Identifikation möglicher Einsatzszenarien der Techniken?
2. Welche Randbedingungen werden durch die Eigenschaften von Selektions- und Manipulationstechniken hinsichtlich ihrer Anwendung spezifiziert?
3. Wie kann ein System aussehen, das die Auswahl von passenden Selektions- und Manipulationstechniken für Anwendungen unterstützt, die auf 3D-Interaktion zurückgreifen?

³<https://ultraleap.com/product/leap-motion-controller>, letzter Abruf 21.02.2021

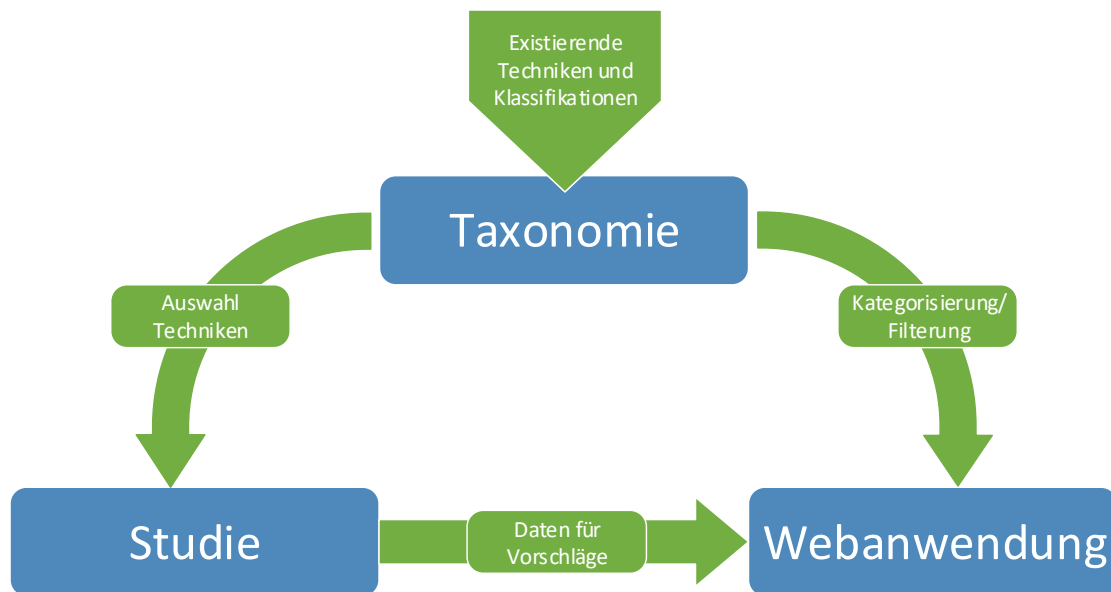


Abbildung 1.3: Zentrale Komponenten der Arbeit.

Anzumerken ist, dass die Teilfragestellungen auf die explizite Erwähnung von VR verzichten, da die betrachteten Interaktionstechniken nicht auf die Verwendung in VR-Anwendungen beschränkt sind. Vielmehr können sie auch im Kontext von 3D-Anwendungen oder Augmented Reality (AR) (Carmigniani et al., 2011) genutzt werden, solange Eingabegeräte verwendet werden, die die Bewegungen der Nutzenden im realen 3D-Raum erfassen können. Dennoch ist VR der primäre Anwendungsfall für diese Techniken und steht in dieser Arbeit entsprechend im Fokus.

1.3 Methodisches Vorgehen und Aufbau der Arbeit

Abbildung 1.3 stellt die drei zentralen Komponenten der Arbeit dar, die zur Beantwortung der Forschungsfragen beitragen. Im Folgenden wird auf das methodische Vorgehen eingegangen, welches zu diesen Ergebnissen führt. Hiervon lässt sich auch die Struktur der Arbeit ableiten.

In Kapitel 2 wird auf die Grundlagen der Interaktion im virtuellen dreidimensionalen Raum eingegangen. Dazu werden wichtige Konzepte erklärt, die im Verlauf der Arbeit aufgegriffen werden. Des Weiteren werden Faktoren genannt, die die Eignung von Interaktionstechniken für bestimmte Anwendungsszenarien beeinflussen, und Kriterien beschrieben, anhand derer die Eignung festgestellt werden kann. Auch verwandte Arbeiten zu Taxonomien und Klassifikationen von Interaktionstechniken und Hilfsmitteln, die die Auswahl von Interaktionstechniken unterstützen können, werden aufgegriffen

Kapitel 3 widmet sich dann der Beantwortung der ersten Teilfrage: „Welche Eigenschaften von Selektions- und Manipulationstechniken erlauben die Identifikation möglicher

Einsatzszenarien der Techniken?“. Hierfür wird eine Taxonomie auf Basis eines iterativen Vorgehens entwickelt. Dabei werden eine Vielzahl von existierenden Interaktionstechniken zusammengetragen, die in wissenschaftlichen Publikationen vorgestellt oder in VR-Anwendungen genutzt werden. Auf Basis dieser Techniken und unter Verwendung existierender Taxonomien und Klassifikationen wird eine umfassende mehrdimensionale Taxonomie erstellt, die die verschiedenen Merkmale der Techniken abbildet. Auf Basis dieser Merkmale können die möglichen Einsatzszenarien für eine Technik eingeschränkt werden. Die Taxonomie ermöglicht es außerdem, verschiedene Techniken anhand ihrer Charakteristiken zu untersuchen und miteinander zu vergleichen.

Der zweiten Teilfrage „Welche Randbedingungen werden durch die Eigenschaften von Selektions- und Manipulationstechniken hinsichtlich ihrer Anwendung spezifiziert?“ wird sich im Kapitel 4 genähert. Hier sollen die Techniken hinsichtlich der gefundenen Eigenschaften untersucht werden, um Vor- und Nachteile von diesen in verschiedenen Szenarien zu identifizieren. Dafür ist der praktische Vergleich verschiedener Interaktionstechniken erforderlich. Da nicht jede Technik umgesetzt und in einer Studie getestet werden kann, muss eine Vorauswahl getroffen werden. Dies erfolgt in dieser Arbeit auf Basis der Taxonomie, indem die Techniken für die Studie so ausgewählt werden, dass die Dimensionen der Taxonomie möglichst vollständig abgedeckt werden. So ist es möglich, die Ergebnisse auf die Dimensionen der Taxonomie zurückzuführen und die Eignung der Techniken für ausgewählte Anwendungsszenarien auf Basis der Eigenschaften der Techniken zu bestimmen. Die durchgeführte Studie wird explorativ gestaltet, um möglichst viele Interaktionstechniken und Anwendungsszenarien abdecken zu können und so Indizien für die Eignung von Techniken in diesen Szenarien zu identifizieren. Insbesondere werden die Resultate der Studie genutzt, um Aussagen und Ergebnisse anderer Studien zu untermauern und Hypothesen für weitere Forschungsarbeiten aufzustellen.

Die dritte Teilfrage „Wie kann ein System aussehen, das die Auswahl von passenden Selektions- und Manipulationstechniken für Anwendungen unterstützt, die auf 3D-Interaktion zurückgreifen?“ steht im Fokus von Kapitel 5 und dreht sich um die Nutzung der gewonnenen Erkenntnisse. Hierfür soll eine webbasierte Anwendung umgesetzt werden, mit der die zusammengetragenen Interaktionstechniken auf Basis der erstellten Taxonomie gefiltert werden können. Über eine interaktive Oberfläche können Entwickelnde somit anhand verschiedener Kategorien, wie die nötige Reichweite oder die durchzuführenden Aufgaben, die auf den Dimensionen der Taxonomie basieren, passende Interaktionstechniken finden. Die Anwendung ermöglicht darüber hinaus das Sortieren ausgewählter Techniken für bestimmte Anwendungsszenarien auf Basis der Resultate der durchgeführten Studie. Im Kapitel 5 wird ebenfalls darauf eingegangen, wie die im Rahmen der Arbeit entwickelten Softwareartefakte und erhobenen Daten zur Verfügung gestellt werden.

Im letzten Kapitel werden eine Zusammenfassung der Arbeit und ein Ausblick auf die möglichen, sich anschließenden Forschungsarbeiten und Weiterentwicklungen gegeben.

1.4 Abgrenzung

Die Interaktion im dreidimensionalen Raum ist vielfältig und das Forschungsfeld der 3D-Interaktion bietet ein weites Feld an offenen Fragestellungen. In dieser Arbeit kann aller-

dings nur ein Bruchteil dieser Fragestellungen betrachtet werden, weshalb im Folgenden auf die festgelegten Einschränkungen eingegangen werden soll.

1.4.1 Interaktion im 3D-Raum

Nach der eingangs genutzten Definition der 3D-Interaktion nach LaViola et al. (2017) kann auch die Nutzung von 2D-Eingabegeräten, deren Eingaben auf Aktionen in einer virtuellen dreidimensionalen Welt abgebildet werden, als Teil der 3D-Interaktion gesehen werden. So kann z.B. auch eine Maus verwendet werden, die grundsätzlich 2D-Eingaben erfasst, um Aktionen im 3D-Raum durchzuführen, wie das Positionieren eines Objekts. Mit aktuellen VR-Systemen ist allerdings die präzise Erfassung von der Position und/oder Orientierung einzelner Körperteile möglich. Dies trägt maßgeblich zur hohen Immersion bei, die durch diese Geräte ermöglicht wird. Aus diesem Grund steht in dieser Arbeit die Interaktion basierend auf Bewegungen im realen 3D-Raum im Fokus.

Um die Eingabegeräte zu beschreiben, auf die die in dieser Arbeit betrachteten Interaktionstechniken basieren können, werden die unterstützten Freiheitsgrade im Sinne der Bewegungsmöglichkeiten im dreidimensionalen Raum verwendet (siehe Abbildung 1.4). Demnach gibt es bis zu sechs Freiheitsgrade, die sich aus den Änderungen in der Position (x-, y- und z-Achse) und den Änderungen der Rotation (rollen, nicken und gieren) zusammensetzen (LaViola et al., 2017). In dieser Arbeit werden somit ausschließlich Interaktionstechniken betrachtet, die Eingabegeräte nutzen, die mindestens drei Freiheitsgrade bei der Erfassung von der Position oder Orientierung entsprechender Körperteile unterstützen. Die Maus würde somit nicht unter diese Definition fallen, da nur zwei Freiheitsgrade unterstützt werden. Die HTC Vive wird dagegen eingeschlossen, da die Position und Orientierung des Kopfes und der Hände in allen Freiheitsgraden durch die VR-Brille und die Controller erfasst werden. Die Brille und der Controller der Oculus Go⁴ ermöglichen ausschließlich die Erkennung der Orientierung im Raum in allen drei Freiheitsgraden, womit diese aber ebenfalls von der Definition abgedeckt werden. Auch Eingabegeräte, die nicht gehalten oder getragen werden müssen, und z.B. durch optische Verfahren die Erfassung von Körperteilen ermöglichen, können unter diese Definition fallen. So erlaubt die Leap Motion beispielsweise die Erkennung der Position und Orientierung der Hand, sowie der einzelnen Finger und somit auch die Erfassung von Gesten. Einige Techniken benötigen zusätzlich Buttons oder Scrollräder, um z.B. eine Selektion auszulösen oder eine zusätzliche 2D Interaktion zu ermöglichen. Diese Techniken widersprechen nicht den genannten Einschränkungen, solange die grundsätzliche Interaktion auf reale dreidimensionale Bewegungen basiert.

In naher Zukunft werden voraussichtlich weitere Interaktionsformen, wie Sprachsteuerung (Hannema, 2001) oder Gedankensteuerung (Bowman et al., 2006), eine wichtige Rolle in der Mensch-Computer-Interaktion einnehmen. Hier ist allerdings noch weitere Forschungsarbeit nötig, bis entsprechende Technologien zuverlässig eingesetzt werden können, und bisher setzen nur wenige Interaktionstechniken auf diese Eingabeformen. Aus diesem Grund werden derartige multimodale Eingaben in dieser Arbeit nicht näher beleuchtet.

⁴<https://oculus.com/go>, letzter Abruf 21.02.2021

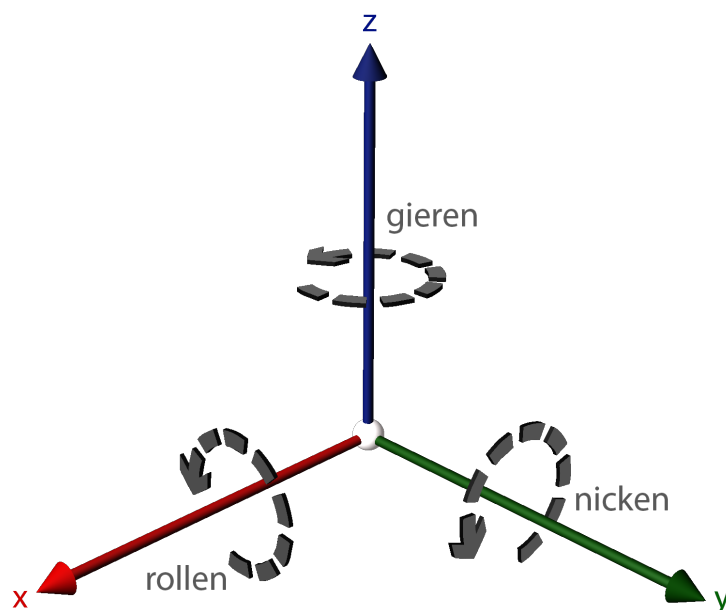


Abbildung 1.4: Mögliche Freiheitsgrade, die ein Eingabegerät unterstützen kann.

1.4.2 Aufgabentypen

Im Laufe der Zeit wurde eine hohe Anzahl an Interaktionstechniken für eine Vielzahl von Aufgaben entwickelt. Die Technik *Over-the-shoulder Deletion* (Mine et al., 1997) ermöglicht z.B. das Löschen eines Objekts, indem es über die eigene Schulter geworfen wird. Wienrich et al. (2017) nutzen das Werfen von Farbbällen auf Objekte, um diese einzufärben. *Yea Big, Yea High* (Jackson et al., 2018) ermöglicht es, Teile der Oberfläche eines Objekts zu selektieren, indem Schnittebenen verwendet werden, die an den virtuellen Händen befestigt sind. Diese Techniken sind vor allem für die Durchführung einzelner sehr spezifischer Aufgaben entwickelt worden und nutzen meist Domänenwissen. Der Vorteil dieser Techniken ist, dass sie speziell für die Anforderungen bestimmter Anwendungsszenarien entwickelt wurden und so eine schnellere, einfachere und zielgerichtete Interaktion ermöglichen können als generische Techniken (J. Chen & Bowman, 2009). Allerdings können sie nicht für mehrere Aufgabentypen eingesetzt werden, und Nutzende von entsprechenden Anwendungen müssen sich ggfs. mehrere Techniken aneignen, um alle in einer Anwendung auftretende Aufgaben durchführen zu können. Um Techniken analysieren und miteinander vergleichen zu können, ist es sinnvoll, die von den Techniken durchführbaren Aufgaben auf universelle Aufgabentypen zu reduzieren. Bowman (1997) definiert hierfür die Fortbewegung, die Selektion und die Manipulation. Die Veränderung eines Objekts setzt in der Regel seine Auswahl voraus, weshalb die Selektion und Manipulation in enger Beziehung zueinander stehen. Aus diesem Grund werden beide in dieser Arbeit betrachtet. Die Fortbewegung verwendet dagegen sich teilweise von der Selektion und Manipulation stark unterscheidende Interaktionskonzepte und steht aus diesem Grund in dieser Arbeit nicht im Fokus.

Die Manipulation lässt sich noch weiter unterteilen, um atomare Aufgabentypen zu erhalten, die auf Aufgaben basieren, die wir ebenso in der realen Welt durchführen (Poupyrev et al., 1997). Diese Arbeit beschränkt sich dabei auf die Positionierung, Rotation und Skalierung (Mine, 1995b). In verschiedenen Arbeiten werden weitere Aufgabentypen definiert,

wie die Systemkontrolle (Mine, 1995b) oder die Text- bzw. Zahleneingabe (Poupyrev et al., 1997). Die atomaren Aufgabentypen können allerdings als Bausteine für komplexere Interaktionen gesehen werden (LaViola et al., 2017). Die Systemkontrolle kann z.B. als eine Kombination aus Manipulation (Menü in das Sichtfeld bringen) und anschließender Interaktion mit dem Menü (Selektion einzelner Elemente) betrachtet werden (Hale & Stanney, 2014). Aus diesem Grund wird sich in dieser Arbeit auf die elementaren Aufgabentypen Selektion, Positionierung, Rotation und Skalierung beschränkt, die in der Literatur auch als kanonische Aufgabentypen bezeichnet werden (LaViola et al., 2017).

1.4.3 Spezielle Eingabegeräte

Einige Interaktionstechniken setzen für deren Nutzung spezielle Eingabegeräte voraus. *Specimen Box* (Zielinski et al., 2017) verwendet z.B. einen realen Würfel aus Acryl, dessen Positions- und Orientierungsänderungen auf ein virtuelles Objekt übertragen werden. Die Technik ermöglicht haptisches Feedback durch das Halten eines plausiblen Objekts. *Elastic-Arm* (Achibet et al., 2015) verwendet ein elastisches Seil zwischen Hand und Schulter, um so die Interaktion zu verbessern und simples haptisches Feedback zu liefern. Derartige Eingabegeräte können dazu beitragen, spezifische Aspekte der Interaktion zu verbessern, stehen aber in der Regel nicht für die alltägliche Nutzung von VR-Anwendungen zur Verfügung. Da sich diese Arbeit auf die Unterstützung der Entwicklung von VR-Anwendungen konzentriert, werden nur aktuell verbreitete Eingabegeräte betrachtet, die Nutzenden entsprechender Anwendungen zur Verfügung stehen. Dazu zählen beispielsweise VR-Systeme wie die Oculus Rift oder die HTC Vive. Auch Eye-Tracking wird betrachtet, da dies z.B. durch das Pupil Labs Eye Tracking⁵ oder durch die Fove⁶ ermöglicht wird.

1.4.4 Ausgabegeräte

Die in dieser Arbeit untersuchten Interaktionstechniken sind theoretisch in allen Anwendungsbereichen nutzbar, in denen auf 3D-Interaktion zurückgegriffen wird. Es gibt viele Systeme, die eine Darstellung von 3D-Umgebungen ermöglichen, wie z.B. einfache Einzel- oder Multi-Monitor Anordnungen für 2D-Darstellungen oder Systeme für die stereoskopische Darstellung, wie Head Mounted Displays (HMDs) oder Volumendisplays. Einen detaillierten Überblick über mögliche Darstellungssysteme geben die Arbeiten von LaViola et al. (2017) und Mihelj et al. (2014). Auch wenn die Interaktionstechniken grundsätzlich mit verschiedenen Systemen nutzbar sind (solange die nötigen Eingabemodalitäten zur Verfügung stehen), können sie sich dennoch unterschiedlich gut für diese Systeme eignen (Bowman et al., 2007). Im Rahmen dieser Arbeit ist es nicht möglich, verschiedene Klassen von Ausgabegeräten zu betrachten, weshalb sich auf Systeme beschränkt wurde, die vollständig immersive VR ermöglichen. Hierunter fallen nach Muhanna (2015) raumbasierte Systeme und binokuläre HMDs, die im Folgenden nur als HMDs bezeichnet werden. Ein bekannter Vertreter der raumbasierten Systeme ist die Cave Automatic Virtual Environment (CAVE) (Cruz-Neira et al., 1993). Bei der CAVE, die in Abbildung 1.5

⁵<https://pupil-labs.com/products/vr-ar>, letzter Abruf 21.02.2021

⁶<https://fove-inc.com>, letzter Abruf 21.02.2021



Abbildung 1.5: CAVE (Muhanna, 2015) und VIVE Pro (HTC Corporation²).

(links) dargestellt ist, wird auf bis zu sechs Wänden ein Videobild projiziert, und mithilfe einer speziellen 3D-Brille kann daraus ein dreidimensionales Bild erzeugt werden. Die Installation ist groß und teuer und deshalb nicht bei der breiten Masse der potenziellen VR-Nutzenden vorhanden. HMDs stehen dagegen mittlerweile in vielen Ausführungen zur Verfügung und sind zugänglicher als raumbasierte Systeme. Aus diesem Grund werden in dieser Arbeit HMDs als primäres Ausgabegerät für die untersuchten Interaktionstechniken angenommen. Abbildung 1.5 (rechts) zeigt das HMD der VIVE Pro, die auch in der in dieser Arbeit vorgestellten Studie verwendet wurde.

1.4.5 Kollaborative Interaktion

Kollaborative virtuelle Umgebungen ermöglichen die Zusammenarbeit mehrerer Nutzer in derselben virtuellen Umgebung (Benford et al., 2001). Neben Social VR-Anwendungen wie AltspaceVR⁷ und VRChat⁸ existieren bereits einige kollaborative VR-Lernanwendungen. Epicsave (Lerner et al., 2019) ermöglicht beispielsweise das Training der Erstversorgung von Patienten. Interaktionstechniken, die für solche kollaborativen Szenarien entwickelt wurden, können die kooperative Interaktion mit virtuellen Objekten vereinfachen. Die Technik *SkeweR* (Duval et al., 2006) ermöglicht beispielsweise die Manipulation eines Objekts simultan durch mehrere Nutzer. Die *EGO-EXO* Technik (Soares et al., 2017) erleichtert die Manipulation von Objekten durch zwei Nutzer, indem diese aus der egozentrischen und exozentrischen Perspektive mit einem Objekt interagieren. Derartige Techniken können zwar die Nutzererfahrung in kollaborativen VR-Anwendungen verbessern, decken jedoch einen eher spezifischen Anwendungsfall ab. Da in dieser Arbeit vor allem generische Anwendungsszenarien betrachtet werden sollen, werden Interaktionstechniken für mehrere Nutzer nicht einbezogen.

⁷<https://altvr.com>, letzter Abruf 21.02.2021

⁸<https://vrchat.com>, letzter Abruf 21.02.2021

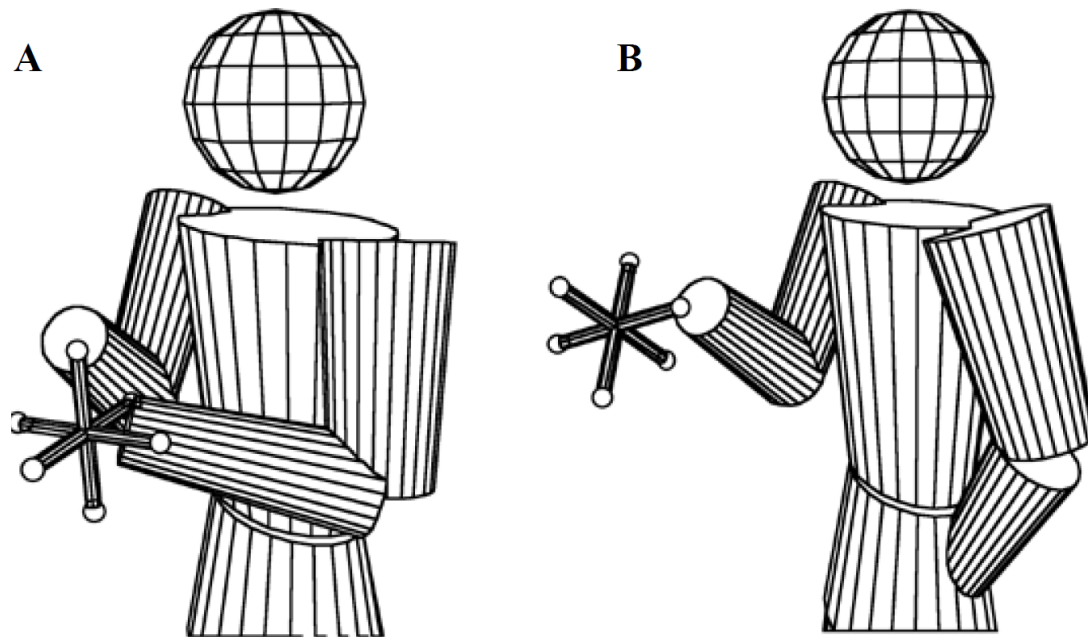


Abbildung 1.6: Beispiel für ein Widget in Form eines Koordinatensystems. Hier wird es in der Hand gehalten (A) oder schwebt im Raum (B) (Mine et al., 1997).

1.4.6 Interaktion mit mehreren Objekten

Nur wenige Techniken sind auf die gleichzeitige Selektion oder Manipulation mehrerer Objekte ausgelegt. So beschreiben beispielsweise Ulinski et al. (2007) Techniken, die es ermöglichen, quaderförmige Volumen zu erstellen, die mehrere Objekte umschließen und somit auswählen können. Grundsätzlich kann ein Großteil der untersuchten Techniken durch simple Erweiterungen auch für die Interaktion mit mehreren Objekten genutzt werden. So könnte beispielsweise ein Modus aktiviert werden, in dem alle darauffolgend selektierten Objekte zur aktuellen Auswahl hinzugefügt werden (Lucas, 2005). Auf diese Weise kann jede Selektionstechnik um die Auswahl mehrerer Objekte erweitert werden, solange der Modus z. B. durch einen Button oder eine Geste aktiviert werden kann. Eine weitere Möglichkeit, mehrere Objekte auszuwählen, ist die Verwendung von Selektionsvolumen wie einem Kegel. Viele der in dieser Arbeit untersuchten Techniken verwenden Selektionsvolumen (siehe Kapitel 3.2.1), die eine Reduzierung der potenziell selektierbaren Objekte auf ein Zielobjekt erfordern (siehe Kapitel 3.2.10). Ohne diese Reduzierung könnten mit diesen Techniken auch mehrere Objekte ausgewählt werden. Auch die Manipulationstechniken könnten erweitert werden, indem die durchgeführte Transformation nicht nur auf ein Objekt, sondern auf alle selektierten Objekte angewendet wird (siehe z.B. Pfeuffer et al. (2017)). Aufgrund der einfachen Erweiterbarkeit der betrachteten Interaktionstechniken für die Interaktion mit mehreren Objekten wurde in dieser Arbeit auf eine detaillierte Beleuchtung dieser Thematik verzichtet.

1.4.7 2D-GUIs und Widgets

Eine indirekte Form der Interaktion mit Objekten stellt die Nutzung von Widgets dar. Dabei werden meist Objekte, wie z.B. die Achsen eines Koordinatensystems, am Zielob-

jekt dargestellt, wodurch die Verschiebung des Objekts auf den drei Achsen durchgeführt werden kann, indem eine der Achsen gegriffen wird. Mine et al. (1997) beschreiben eine ähnliche Technik, bei der derartige Widgets in der Hand anstatt am Objekt dargestellt werden. In Abbildung 1.6 sind beide Formen visualisiert. Auch interaktive 2D-GUIs werden in einigen Techniken verwendet. *Friction Surfaces* (Andujar & Argelaguet, 2007a) wurden beispielsweise entwickelt, um die Interaktion mit 2D-GUIs in VR zu vereinfachen. *Virtual Pads* (Andujar & Argelaguet, 2007b) ermöglichen die Nutzung von externen 2D-Oberflächen in VR. Die Interaktion mit Widgets kann wiederum auf die in dieser Arbeit betrachteten Selektions- und Manipulationstechniken und die elementaren Aufgabentypen zurückgeführt werden. Aus diesem Grund werden keine Techniken betrachtet, in denen diese Elemente im Zentrum stehen. Davon ausgeschlossen sind Techniken, die Widgets als eine Form des Feedbacks verwenden (siehe Kapitel 3.2.9).

1.5 Eigene Vorarbeiten

Im Verlauf des hier vorgestellten Promotionsvorhabens sind wissenschaftliche Veröffentlichungen entstanden, die im Folgenden zusammengefasst werden sollen.

- In (Weise et al., 2015) wurde ein Framework vorgestellt, das die systematische Zusammenführung der Daten verschiedener Eingabegeräte ermöglicht und Entwicklenden ein abstrahiertes Körpermodell zur Verfügung stellt, um so insbesondere die Entwicklung von VR-Lernanwendungen zu vereinfachen.
- In (Weise & Zender, 2017) wurden VR-Lernwelten hinsichtlich ihrer vorherrschenden Handlungsmöglichkeiten betrachtet. Die Lernwelten wurden in Expositionswelten, Explorationswelten, Trainingswelten, Experimentalwelten und Konstruktionswelten eingeteilt. Diesen wurden Interaktionstechniken zugeordnet, wobei insbesondere der in diesen Lernwelten ermöglichte Interaktionsgrad betrachtet wurde.
- Das Promotionsvorhaben wurde erstmals in Form eines Posters vorgestellt (Weise & Zender, 2018). Ausgehend von dem bestehenden Problem passende Interaktionstechniken für VR-Anwendungen auszuwählen, wurde hier insbesondere auf die Zielstellungen des Vorhabens und das Vorgehen eingegangen.
- Mit (Weise & Zender, 2019) wurde eine Sammlung von unabhängigen Variablen veröffentlicht, die in Studien zu 3D Selektions- und Manipulationstechniken genutzt werden. Hierfür wurde eine strukturierte Literaturanalyse durchgeführt und die in den gefundenen Studien variierten Aufgaben-, Nutzer- und Umgebungscharakteristiken wurden zusammengefasst und diskutiert.
- In (Weise et al., 2019) wurde die erste Version der in dieser Arbeit vorgestellten Taxonomie präsentiert. Hierfür wurden bestehende Klassifikationen und Taxonomien betrachtet und unter Berücksichtigung der Eigenschaften von Interaktionstechniken eine umfassende Taxonomie erstellt.
- Eine überarbeitete Version der Taxonomie wurde in (Weise, Zender & Lucke, 2020) veröffentlicht. Des Weiteren wurden hier typische Probleme bei der Interaktion in

VR mit den Dimensionen der Taxonomie in Bezug gesetzt und Teile der Ergebnisse der in dieser Arbeit vorgestellten Studie präsentiert.

Begleitend zu diesem Promotionsvorhaben wurde das Potenzial von VR für den Einsatz in der Lehre und im Lernen erforscht. Im Folgenden soll auf die hieraus entstandenen Publikationen eingegangen werden.

- Im Rahmen der Arbeit als Sprecher und Akteur der Arbeitsgruppe VR/AR-Learning⁹ ist ein Positionspapier entstanden, das die Chancen und Herausforderungen beim Lernen und Lehren mit VR/AR-Technologien beleuchtet (Zender et al., 2018a). Hierfür wurde ein kollaboratives Online-Brainstorming mit Fachexperten durchgeführt.
- In (Zender et al., 2018b) wurden die Ergebnisse des Online-Brainstorming tiefergehend diskutiert.
- In (Richter & Weise, 2018) wurde aufbauend auf einer studentischen Arbeit (Richter, 2017) der mögliche Einsatz von VR für die Bewertung von Naturgefahren untersucht. Hierbei wurden mögliche Lernszenarien entwickelt und eine Auswahl von diesen in einer VR-Lernanwendung umgesetzt.
- Mit der Arbeit im Projekt HandLeVR¹⁰, in dem eine VR-Lackierwerkstatt für den Einsatz in der Ausbildung angehender Lackierender umgesetzt wird, gingen weitere Veröffentlichungen einher (Weise, Schulz et al., 2020; Zender et al., 2020, 2019). In diesen Arbeiten wird insbesondere auf das didaktische Design, die Projektstruktur und die einzelnen Komponenten der Anwendung eingegangen.

Einige dieser Vorarbeiten werden im weiteren Verlauf aufgegriffen und an den entsprechenden Stellen dieser Arbeit referenziert.

⁹<https://ak-vrarl.gi.de>, letzter Abruf 21.02.2021

¹⁰<https://handlevr.de>, letzter Abruf 21.02.2021

Kapitel 2

Grundlagen und verwandte Arbeiten

Das Forschungsfeld der Mensch-Computer-Interaktion kann auf eine Vielzahl fundamentaler Entwicklungen bei der Interaktion mit Desktop-PCs zurückblicken. Die Bedienung von GUIs (Graphical User Interface) nach dem WIMP Prinzip (Windows, Icons, Menus, Pointer) (van Dam, 1997) unter Verwendung von Maus und Tastatur zählt noch heute zu den gängigsten Arten der Steuerung von Computern. Diese Form der Interaktion unterliegt vielen Beschränkungen, wodurch die Nutzung und Entwicklung allerdings auch vereinfacht wird. So sind viele Anwendungen auf zwei Dimensionen beschränkt und auch die Maus ruht auf einer Oberfläche und kann nur auf zwei Achsen bewegt werden (Bowman, 1999). Neue Technologien, wie Virtual und Augmented Reality, ermöglichen aber neue Formen der Mensch-Computer-Interaktion, die stark von der bisherigen Bedienung von zweidimensionalen Oberflächen abweicht (Tanriverdi & Jacob, 2001). Die Dreidimensionalität bietet eine Vielzahl neuer Möglichkeiten, bringt aber auch neue Probleme mit sich. Auch wenn wir in einer dreidimensionalen Welt leben, bietet die physische Welt viele Eigenschaften, die uns dabei unterstützen, dort zu agieren, die aber noch nicht in ausreichender Form in virtuellen Welten nachgebildet werden können (LaViola et al., 2017). Die verwendeten Eingabegeräte sind darüber hinaus meist frei im Raum bewegbar, was zu Ungenauigkeiten bei deren Verwendung und Ermüdung bei den Nutzenden führen kann (Bowman, 1999). Bei der Gestaltung der Interaktion in einem virtuellen dreidimensionalen Raum sind somit viele verschiedene Aspekte zu beachten. In diesem Kapitel sollen ausgewählte Konzepte, die bei der 3D Interaktion eine elementare Rolle spielen, vorgestellt werden. Des Weiteren soll auf Faktoren eingegangen werden, die die Interaktion im dreidimensionalen Raum beeinflussen und es werden Kriterien vorgestellt, anhand derer die Performance von Techniken eingeschätzt werden kann, um diese miteinander vergleichen zu können. Abschließend wird auf verwandte Arbeiten zu Taxonomien und Klassifikationen von Interaktionstechniken und Hilfsmitteln für die Auswahl von Interaktionstechniken eingegangen.

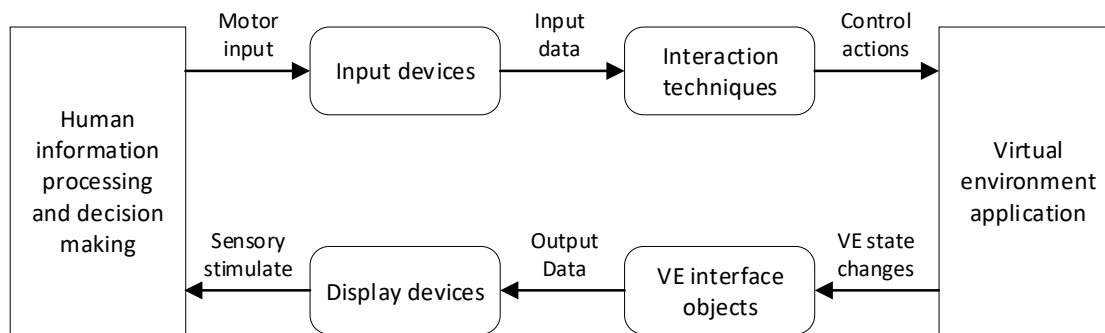


Abbildung 2.1: Modell zur Interaktion in VR-Umgebungen (nach Poupyrev und Ichikawa (1999)).

2.1 Grundlegende Konzepte der 3D-Interaktion

Der folgende Abschnitt soll dazu dienen, wichtige Konzepte bezüglich der Interaktion im dreidimensionalen Raum zu erläutern. Diese werden im Verlauf der Arbeit aufgegriffen und in Bezug zu Eigenschaften von Interaktionstechniken gesetzt.

2.1.1 Motorische Steuerung

Die Steuerung von Bewegungen kann in *open-loop control* und *closed-loop control* unterteilt werden (Proctor & Vu, 2006). Bei der *open-loop control* werden Bewegungen auf Basis eines internen Modells oder Plans durchgeführt. Das heißt, die Bewegungen werden auf Grundlage eines Erinnerungsbildes nacheinander ausgeführt, ohne dass Feedback nötig ist bzw. beachtet wird. Bei der *closed-loop control* dagegen ist zwingend Feedback nötig. Die Bewegungen werden permanent anhand des Feedbacks mit einem Zielzustand verglichen und wenn nötig korrigiert. Bewegungen unter *open-loop control* können schnell und ohne Verzögerung durch die Verarbeitung von Feedback durchgeführt werden, sind aber dafür unpräziser. Die *closed-loop control* ist langsamer, erlaubt aber eine höhere Genauigkeit. Entsprechend werden beide Formen der Bewegungskontrolle oft kombiniert angewendet (Proctor & Vu, 2006).

2.1.2 Modell zur Interaktion in VR-Umgebungen

Poupyrev und Ichikawa (1999) haben das Modell für Mensch-Computer Schnittstellen von (Taylor, 1957), welches später für die Mensch-Computer-Interaktion adaptiert wurde (Latta & Oberg, 1994; MacKenzie, 1995), für die Interaktion in VR-Umgebungen angepasst (siehe Abbildung 2.1). Dieses Modell kann als *closed-loop System* verstanden werden. Die Eingaben eines/einer Nutzer/in, wie die Positionen von Körperteilen, Sprachbefehle oder Handgesten, werden von Eingabegeräten erfasst und mit Hilfe von Interaktionstechniken auf Aktionen in der VR-Anwendung abgebildet. Dies kann z.B. in eine Veränderung der Form, Position, Farbe oder anderer Eigenschaften verschiedener virtueller Objekte

münden. Ausgabegeräte geben diese Änderungen in Form von visuellen, auditiven oder anderen Feedbacks an den/die Nutzer/in zurück, worauf diese/r wieder reagieren kann.

2.1.3 Fitts' Law

Eines der wichtigsten Modelle zur Beschreibung der Performance motorischer Bewegungen ist *Fitts' Law* (Fitts, 1954). Es sagt die Zeit voraus, die nötig ist, um mit einer zielgerichteten Bewegung eine Zielposition zu erreichen:

$$MT = a + b \log_2\left(\frac{D}{W} + 1\right)$$

Dabei ist MT die benötigte Zeit, D die Entfernung zum Ziel und W die Größe des Ziels. a und b sind von der Wahl des Eingabegeräts abhängig und werden meist empirisch bestimmt. Aus der Formel lassen sich die Schlussfolgerungen ziehen, dass sich die benötigte Zeit erhöht, wenn sich die zu überbrückende Distanz vergrößert und dass sich die benötigte Zeit verringert, wenn sich die Größe des Objekts vergrößert (Proctor & Vu, 2006). Die Präzision, die nötig ist, um das Ziel zu erreichen, wird durch den hinteren Teil der Formel beschrieben, der auch als *Index of Difficulty* (ID) bekannt ist:

$$ID = \log_2\left(\frac{D}{W} + 1\right)$$

Hiermit kann somit bestimmt werden, wie schwer es ist, ein Objekt auszuwählen. Die hier dargestellte Form des Schwierigkeitsindex ist auch als die Shannon-Form bekannt (MacKenzie, 1992) und die meist genutzte Variante im Fachbereich der Mensch-Computer-Interaktion. Um die Leistung von Nutzenden zu bestimmen, kann außerdem der Performanzindex (IP) verwendet werden:

$$IP = \frac{ID}{MT}$$

Hier werden somit der Schwierigkeitsindex und die benötigte Zeit miteinander kombiniert. Der Performanzindex wird auch als Durchsatz bezeichnet.

Die aufgeführten Berechnungen beziehen sich in erster Linie auf das Führen der Hand zu einem Objekt. Wingrave und Bowman (2005) haben gezeigt, dass Fitts' Law auch bei der Auswahl von Objekten durch das Zeigen auf diese in virtuellen Umgebungen gilt. Im Laufe der Zeit gab es viele Variationen und Anpassungen von Fitts' Law. Kopper et al. (2010) erweiterten das Modell z.B. um die Entfernung zwischen dem/der Nutzer/in und dem Objekt, um die Selektion aus einer größeren Entfernung einzuschließen. Fitts' Law ist ursprünglich auf Selektionsaufgaben beschränkt. Deng et al. (2019) haben aufbauend auf Fitts' Law ein Drei-Phasen-Modell entwickelt, das auch auf die Manipulation von Objekten angewendet werden kann. Damit ist es möglich, die Zeit vorherzusagen, die zur Positionierung eines Objekts benötigt wird. Für weitere Ausführungen zu Fitts' Law und dessen Weiterentwicklung wird auf (Soukoreff & MacKenzie, 2004) verwiesen.

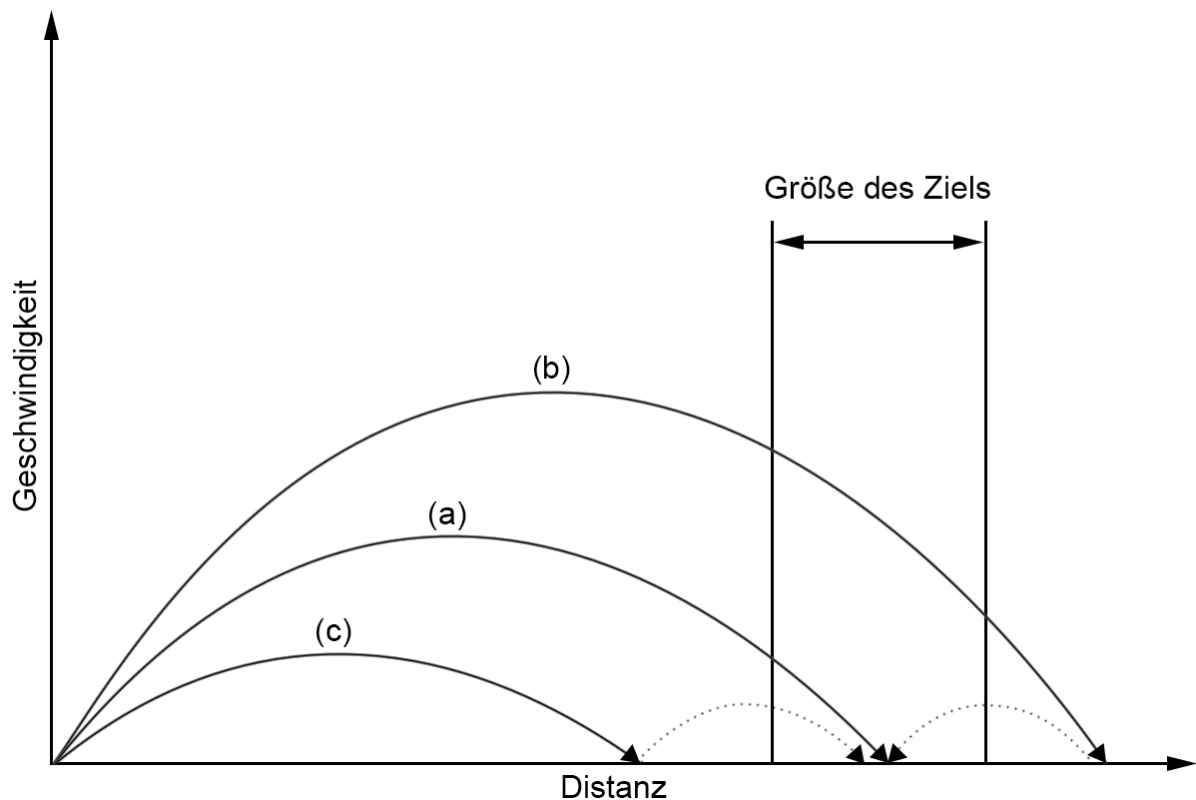


Abbildung 2.2: Mögliche Sequenzen von Bewegungen zum Ziel auf Basis des Optimized Initial Impulse Models (nach Balakrishnan (2004)). (a) Ziel wird mit einer Bewegung erreicht. (b) und (c) Bewegung ist zu kurz oder zu weit und muss korrigiert werden.

2.1.4 Speed-Accuracy Tradeoff

Fitts' Law führt zu der Schlussfolgerung, dass die Geschwindigkeit und die Präzision bei der Durchführung einer Aufgabe in direkter Verbindung zueinander stehen. Das heißt, je präziser eine Aufgabe durchgeführt wird, desto mehr Zeit ist dafür nötig. Umgekehrt sinkt die Präzision, je schneller eine Aufgabe durchgeführt wird. Dies wird auch als der *Speed-Accuracy Tradeoff* bezeichnet (Zhai et al., 2004). Neben dieser formalen Ebene kommt hinzu, dass auch die Nutzenden unterschiedliche Präferenzen haben. Ein/e Nutzer/in möchte die Aufgabe eventuell eher schnell lösen, während jemand anderes eine höhere Präzision bevorzugt. Auch kann es Nutzenden schwerfallen Geschwindigkeit und Präzision gleichzeitig zu optimieren (Wingrave & Bowman, 2005). Insbesondere in Studien, wo beides erfasst werden soll, kann dies zu Problemen führen. Anzumerken ist außerdem, dass auch wenn bei der Bestimmung des im vorherigen Kapitel angesprochenen Durchsatzes der Schwierigkeitsindex und die benötigte Zeit mit einbezogen werden, dieser unabhängig vom Speed-Accuracy Tradeoff ist (MacKenzie & Isokoski, 2008).

2.1.5 Optimized Initial Impulse Model

Das von Meyer et al. (1988) entwickelte *Optimized Initial Impulse Model* ist als das Modell bekannt, das alle Aspekte von Fitts' Law am ehesten erklärt (Balakrishnan, 2004). Abbil-

dung 2.2 stellt drei mögliche Sequenzen anhand des Modells dar. In dem Modell startet die Interaktion mit einer Bewegung zum Ziel, was auch ballistische Phase genannt wird, mit der ein Großteil der Distanz zum Objekt überbrückt wird. Wird das Ziel damit erreicht, ist die Interaktion beendet. Abhängig von der durchführenden Muskelgruppe kann diese Bewegung aber auch zu weit oder zu kurz führen (Argelaguet & Andujar, 2013). Dann sind kleinere korrigierende Bewegungen nötig bis das Ziel erreicht ist. Fitts' Law folgt also aus der Minimierung der durchschnittlichen Bewegungszeit, während versucht wird, das Objekt oft direkt zu treffen, und der Durchführung weiterer korrigierender Bewegungen, wenn der Index of Difficulty zu hoch ist (Proctor & Vu, 2006). Auf ähnliche Weise kann die Positionierung von Objekten in drei Phasen unterteilt werden: (1) initiale Selektion des Objekts, (2) großräumige Bewegung zur Zielposition und (3) abschließende präzise Bewegungen (Hannema, 2001; Teather & Stuerzlinger, 2007).

2.2 Einflussfaktoren auf die Eignung von Interaktionstechniken

Die genannten Konzepte ermöglichen die theoretische Beschreibung der Interaktion in virtuellen Welten und eine erste Einschätzung über den Schwierigkeitsgrad einer Aufgabe und der erwarteten Zeit für das Lösen dieser. Insbesondere Aufgaben im dreidimensionalen Raum werden durch viele weitere Faktoren beeinflusst (Cashion et al., 2013), die in diesem Kapitel aufgegriffen werden sollen. Bowman und Hodges (1999) nennen vier externe Faktoren, die Einfluss auf die Performance einer Interaktionstechnik haben können: *Aufgaben-*, *Umgebungs-*, *Nutzer-* und *Systemcharakteristiken*. Auf Basis dieser Charakteristiken und des in Kapitel 2.1.2 vorgestellten Modells der Interaktion in VR-Umgebungen werden die im Folgenden beschriebenen Einflussfaktoren hinsichtlich der Nutzenden, der Ein- und Ausgabegeräte, der Interaktionstechnik und der Anwendung betrachtet. Dabei werden vor allem Faktoren fokussiert, die sich auf die Performance von Interaktionstechniken auswirken. Für weiterführende Betrachtungen wird auf LaViola et al. (2017) verwiesen.

2.2.1 Nutzende

Der Mensch steht in VR-Anwendungen, wie bei keinem anderem Medium, im Mittelpunkt des Geschehens. Es ist allerdings schwierig, Nutzende einer Anwendung im Vorfeld einzuschätzen, weshalb ein breites Spektrum an Nutzercharakteristiken beachtet werden und auch bei der Evaluation von Interaktionstechniken miteinbezogen werden sollte (Bowman, Gabbard & Hix, 2002). In vielen vergleichenden Studien werden Nutzermerkmale allerdings nur erfasst, um die demografische Verteilung der Testpersonen zu ermitteln und selten, um tatsächlich Einflüsse auf die Interaktionstechniken festzustellen (Weise & Zender, 2019). Einige der wenigen Studien, die hierauf einen Fokus legt, wurde von Wingrave et al. (2005) durchgeführt. Dabei haben Nutzende einen stärkeren Einfluss bei 3D-Interaktion als bei 2D-Interaktion. Einige Nutzende verstehen komplexe Techniken schnell und können intuitiv mit diesen arbeiten, während andere große Schwierigkeiten mit diesen haben (Bowman, 2002). Auch können Nutzende Schwierigkeiten, die in der Dreidimensionalität

auftreten, unterschiedlich gut kompensieren. Im Folgenden sollen Faktoren zur Eignung von Interaktionstechniken beleuchtet werden, die auf den Menschen zurückgeführt werden können und in denen sich Nutzende teilweise auch stark unterscheiden können.

Unerreichbare Präzision

Das Halten eines Körperteils in einer konstanten Position wird unweigerlich vom natürlichen Tremor beeinflusst (Vaillancourt & Newell, 2000). 3D-Interaktion basiert im Allgemeinen auf Eingabegeräte, die Bewegungen im dreidimensionalen Raum erfassen. Da hier, anders als z.B. bei der Bedienung einer Desktop-Maus, die Arme normalerweise nicht stabilisierend abgelegt werden können, führt der natürliche Tremor zu merklichen Ungenauigkeiten (König et al., 2009). Insbesondere Techniken, die auf das Zeigen auf Objekten mit z.B. einem Lichtstrahl basieren, sind hierfür anfällig, da sich kleine Bewegungen der Hand auf größere Distanz verstärken (Bowman, 1999). Es gibt verschiedene Filtermechanismen (siehe z.B. Oh und Stuerzlinger (2002)), die Ungenauigkeiten bei der Bewegung glätten; dabei wird allerdings auch immer eine Verzögerung hinzugefügt, die bei der Interaktion stören kann (Pavlovych & Stuerzlinger, 2009). Selbst mit perfekter Tremor-Kompensation wäre es aufgrund von Limitierungen der Hand-Auge-Koordination, der Präzision des Bewegungsapparates und der Feinregulierung der Muskelgruppen unmöglich, eine perfekte Präzision zu erreichen (König et al., 2009). Einige Interaktionstechniken nutzen Mechanismen, wie z.B. Disambiguierung oder skalierte Abbildungsfunktionen, mit deren Hilfe langsame Bewegungen nochmals verlangsamt werden, die hier Abhilfe schaffen können. Hierauf wird in Kapitel 3.2 näher eingegangen.

Ermüdung der Gliedmaßen

Das lange Halten einer Position beim Selektieren von Objekten oder ausladende Bewegungen beim Manipulieren von Objekten können schnell zur Ermüdung der Arme führen. Vor allem aus der Interaktion mit Touchscreen-Monitoren ist der *Gorilla-Arm-Effekt* bekannt (Boring et al., 2009), der die Ermüdung des Arms beschreibt, wenn er für eine lange Zeit ausgestreckt wird. Dieser kann auch bei der 3D-Interaktion auftreten. Je höher der Arm gehalten wird und je weiter weg sich dieser vom Körper befindet, desto anstrengender wird die Position für die Nutzenden (LaViola et al., 2017). Eine Position, in der der Arm angewinkelt ist, die Hand vor dem Körper gehalten wird und die Schultermuskeln weniger genutzt werden, führt dagegen zu weniger Ermüdung (Hincapié-Ramos et al., 2014). Eine längere Ermüdung kann auch zu Schmerzen führen und sollte entsprechend vermieden werden.

Vorerfahrungen und kognitive Fähigkeiten

Vorerfahrungen mit Computern, 3D-Anwendungen, virtuellen Umgebungen oder ähnlichen Ein- und Ausgabegeräten können einen Einfluss darauf haben, wie gut Nutzende mit bestimmten Interaktionstechniken umgehen können (Bowman, 1999; LaViola et al., 2017). Viele Interaktionstechniken basieren auf Konzepten aus der echten Welt und verlassen

sich darauf, dass Nutzende diese kennen und mit dem Anwendungsszenario verknüpfen können. Bei der Technik *Crank Handle* (Bossavit et al., 2014) können die Nutzenden das Objekt beispielsweise drehen, indem rotierende Bewegungen, wie bei der Verwendung einer Kurbel, genutzt werden.

Auch das Alter der Nutzenden soll an dieser Stelle als Einflussfaktor genannt werden. So haben Kinder beispielsweise eine kürzere Aufmerksamkeitspanne und ein anderes mentales Modell der Interaktion als Erwachsene (LaViola et al., 2017). Möglicherweise kennen sie Interaktionskonzepte aus der realen Welt noch nicht, auf die Interaktionstechniken aufbauen. Aber auch der Bildungsstand und die Fähigkeit, im dreidimensionalen Raum zu planen und zu agieren, können sich auf die Nutzbarkeit von Techniken auswirken.

Körperliche Merkmale

Menschen unterscheiden sich in verschiedenen körperlichen Merkmalen, wie z.B. Geschlecht, Größe und Armlänge (Bowman, 1999). So haben Menschen unterschiedlicher Größe beispielsweise verschiedene Perspektiven auf die virtuelle Welt, die die Selektion von Objekten beeinflussen können, weil Objekte verdeckt sein könnten (Wingrave & Bowman, 2005). Entsprechend können Techniken, die auf konkreten körperlichen Merkmalen basieren, die Interaktion beeinflussen. Die Verlängerung des Arms bei der *Go-Go* Technik (Poupyrev et al., 1996) beginnt z.B. ab einer vordefinierten Distanz zwischen Hand und Körper. Menschen mit längeren Armen haben hierdurch eine größere Reichweite als Menschen mit kürzeren Armen. Auch weitere Faktoren, wie körperliche Einschränkungen, verminderte Sehschärfe oder Farbblindheit, können bei konkreten Techniken zu einer geringeren Nutzbarkeit führen (Dix, 2004).

Persönliche Präferenzen

Nutzende bauen bei der Interaktion mit der virtuellen Welt ein eigenes mentales Modell auf Basis des Feedbacks und der verwendeten Eingabegeräte auf (Wingrave et al., 2002). Die bisher genannten Nutzercharakteristiken münden darin, dass Menschen unterschiedliche Interaktionsmuster verfolgen, unterschiedliche Bedürfnisse aufweisen und unterschiedliche Präferenzen haben, die sich auf die Eignung von Interaktionstechniken auswirken können (Octavia et al., 2011; Wingrave, 2009). So hat beispielsweise die Händigkeit einen Einfluss und Menschen bevorzugen entsprechend unterschiedliche Richtungen für Handbewegungen (Ren & O'Neill, 2013). Die Nutzenden können je nach Technik unterschiedliche Strategien verfolgen, um eine Aufgabe zu lösen. Die Zoom Technik ermöglicht es beispielsweise, an das Ziel heranzuzoomen, bis es eine ausreichende Größe für die Selektion hat (Bacim et al., 2013). In der Studie von Bacim et al. (2013) wählten die Probanden eine unterschiedlich starke Vergrößerung, um entweder die Präzision oder die Zeit zu optimieren (siehe auch Kapitel 2.1.4). In der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Studie (siehe Kapitel 4) wurden ebenfalls unterschiedliche Strategien bei den Testpersonen beobachtet.

2.2.2 Ein- und Ausgabegeräte

Da in dieser Arbeit VR-Anwendungen im Fokus stehen, wird in diesem Abschnitt vorrangig auf die Probleme entsprechender Systeme eingegangen. Seit dem Aufkommen der Oculus Rift im Jahr 2012 hat die Entwicklung zugänglicher und erschwinglicher VR-Systeme neuen Wind bekommen. Aktuelle Systeme, wie die Oculus Quest¹ oder die HTC Vive Pro², ermöglichen bereits ein sehr immersives Erleben der virtuellen Welt. Zusätzliche Geräte, wie die Kinect³ oder die Leap Motion, erweitern die Art der möglichen Interaktion. Die genannten Ein- und Ausgabegeräte unterscheiden sich in Details, wie die erfassten Körperteile oder die angebotenen Eingabemöglichkeiten, auf welche im Folgenden genauer eingegangen werden soll. Für einen tieferen Einblick in VR-Hardware wird auf die Arbeit von Anthes et al. (2016) verwiesen.

Tracking

Die erwähnten VR-Systeme Oculus Quest und HTC Vive Pro unterscheiden sich hinsichtlich der verwendeten Controller nur geringfügig. Durch das Halten der Controller werden die Position und Orientierung der Hände erfasst. Nicht alle Systeme ermöglichen allerdings eine derartige Erfassung aller sechs Freiheitsgrade, d. h. die Erkennung der Rotation und Position auf allen drei Achsen des dreidimensionalen Raums (siehe auch Kapitel 1.4.1). Die Oculus Go nutzt beispielsweise einen Controller, der nur die Orientierung der Hand erkennen kann. Auch die VR-Brille selbst kann nur die Ausrichtung des Kopfes erfassen, allerdings nicht dessen Position im Raum. Entwickelnde müssen bei der Auswahl oder Entwicklung von Interaktionstechniken die erfassten Freiheitsgrade miteinbeziehen. Das sich immer weiter verbreitende *Inside-Out Tracking* begegnet dieser Einschränkung allerdings. Dabei sind an der VR-Brille mehrere Kameras angebracht, die es ermöglichen, die VR-Brille im Raum zu orten und sowohl die Ausrichtung als auch die Position des Kopfes herzuleiten. Auch die Controller können so in allen sechs Freiheitsgraden erfasst werden, wenn sie von den Kameras erkannt werden. Das Pendant dazu ist das *Outside-In Verfahren*, wie es beispielsweise die VR-Brille der Playstation⁴ verwendet. Bei diesem Verfahren erkennt eine externe Kamera Merkmale an den zu erfassenden Geräten und kann somit deren Position und Orientierung im Raum bestimmen. Unabhängig vom verwendeten Verfahren sind trotz bisher erreichter sehr hoher Präzision Jitter und Ungenauigkeiten beim Tracking unvermeidbar, was z.B. durch Verdeckung ausgelöst werden kann.

Neben den Händen gibt es weitere Körperteile, die durch zusätzliche Geräte erfasst werden können. Die bereits erwähnte Kinect kann beispielsweise die Positionen aller größeren Körperpartien im Raum ermitteln. Die Leap Motion ermöglicht das Tracking der Finger. Auch tragbare Sensoren können verwendet werden, um spezifische Körperpartien zu erfassen. So kann der Vive Tracker⁵ zusammen mit Vive-Systemen verwendet werden und an beliebige Stellen am Körper angebracht werden. *Inertial Measurement Units (IMUs)* können auf eine ähnliche Weise verwendet werden, können allerdings nur die Orientierung

¹<https://oculus.com/quest>, letzter Abruf 21.02.2021

²<https://vive.com/de/product/vive-pro>, letzter Abruf 21.02.2021

³<https://developer.microsoft.com/de-de/windows/kinect>, letzter Abruf 21.02.2021

⁴<https://playstation.com/de-de/ps-vr>, letzter Abruf 21.02.2021

⁵<https://vive.com/de/accessory/vive-tracker>, letzter Abruf 21.02.2021

erfassen und sind anfällig für Drift (Anthes et al., 2016), wodurch die erfassten Werte im Verlauf der Zeit immer stärker von der Realität abweichen. Dieses Problem kann mit anderen Tracking-Verfahren, wie z.B. das der angesprochenen Vive-Systeme, kompensiert werden.

Zusätzliche Eingabemöglichkeiten

Auch wenn die 3D-Interaktion vorrangig auf Bewegungen im dreidimensionalen Raum basiert, werden dennoch Buttons benötigt, um beispielsweise eine Selektion auszulösen, wenn keine anderen Mechanismen wie Gesten verwendet werden. Ein Problem, das bei der Nutzung solcher diskreten Eingabemechanismen auftreten kann, ist der *Heisenberg Effekt*. Dieser bezeichnet das Phänomen, dass ein im Raum erfasstes Eingabegerät die Position minimal verändert, sobald der Button gedrückt wird (Bowman, Wingrave et al., 2002). Dies kann zu einer Positionsänderung des Cursors kurz vor der Selektion führen. Auch bei gestenbasierter Interaktion kann dieses Problem auftreten, da das Formen der Geste zu einer Positionsänderung der Hand führen kann (Caputo et al., 2017; Wingrave et al., 2002).

Die Anzahl der Buttons kann sich zwischen verschiedenen Controllern unterscheiden. Auch bieten einige Controller weitere Eingabemöglichkeiten, wie Joysticks oder Touchpads, an. Eine Interaktionstechnik muss entsprechend auf die zur Verfügung stehenden Eingabemöglichkeiten angepasst sein.

Weitere technische Beschränkungen

Ein- und Ausgabegeräte haben sich in den letzten Jahren stark weiterentwickelt, aber weisen dennoch einige technische Limitierungen auf, die sich auf die Interaktion auswirken. Darunter zählen z.B. Latenz, Bildwiederholraten und Eigenschaften der Darstellung wie beispielsweise 3D/2D, Sichtfeld, Auflösung und Helligkeit (Bowman, 1999). Diese sind von Entwicklern meist nicht beeinflussbar, aber können sich dennoch auf die Funktionalität von Interaktionstechniken auswirken. Auch die zur Verfügung stehende Rechenleistung unterscheidet sich z.B. stark bei Systemen wie der autarken Oculus Quest und der auf einen Desktop-PC angewiesenen HTC Vive Pro.

2.2.3 Interaktionstechnik

Auch Design-Entscheidungen bei der Technik können zu Problemen bei der Interaktion mit virtuellen Objekten führen. Auf drei dieser Probleme soll im Folgenden eingegangen werden.

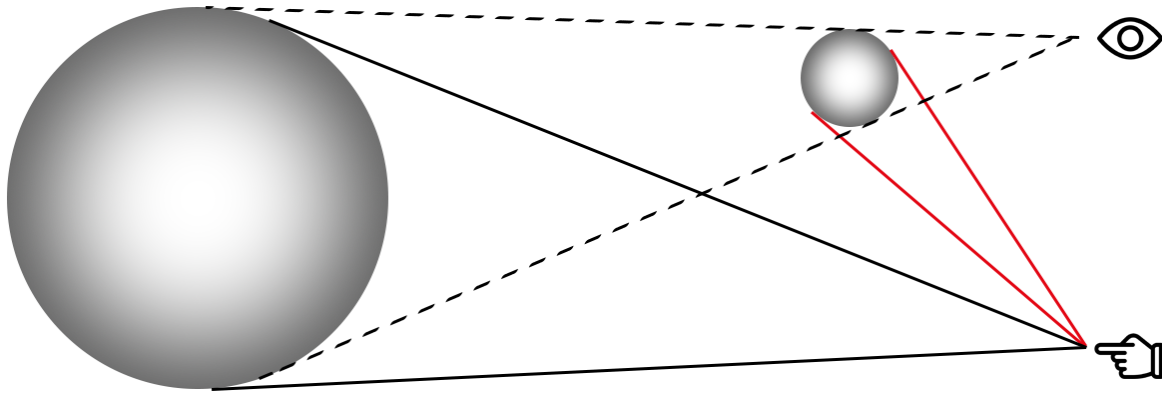


Abbildung 2.3: Solid angle mismatch: Auf kürzerer Distanz verringert sich die Fläche des Objekts, die sowohl von der Hand als auch den Augen aus sichtbar ist (nach Argelaguet et al. (2008)).

Midas Touch Effekt

Bei einigen Interaktionstechniken wird eine Verweilzeit verwendet, die dazu führt, dass der Cursor das Objekt eine vorgegebene Zeitspanne lang berühren muss, damit es ausgewählt wird. Oft wird diese Art der Auswahl bei Techniken verwendet, die auf Bewegungen des Kopfes oder der Augen basieren, damit keine zusätzlichen Controller und Buttons nötig sind. Nutzende müssen sich normalerweise in der Umgebung umschaun, um das Objekt von Interesse zu finden. Bei einer geringen Verweilzeit kann hierbei ungewollt ein Objekt ausgewählt werden, welches nicht das Zielobjekt ist. Dieses Problem wird als der *Midas Touch Effekt* bezeichnet (Jacob, 1992). Der Effekt kann auch bei der Interaktion mit der Hand auftreten, wenn diese eine vorgegebene Zeit lang über ein Objekt gehalten werden muss, um dieses auszuwählen (Dam et al., 2013).

Perspektivischer Versatz zwischen Hand und Augen

Eine Problematik, die vor allem bei Techniken auftritt, die einen Lichtstrahl nutzen, der von der Hand ausgeht, ist, dass sich die Perspektive von der Position der Hand potentiell von der aus Sicht der Augen unterscheidet. Argelaguet et al. (2008) bezeichnen dies als *Eye-hand visibility mismatch* und haben hierbei konkret die beiden Probleme *solid angle mismatch* und *occlusion mismatch* identifiziert. Ersteres kann in jeglichen Szenarien auftreten, auch bei einzelnen Objekten. Wie in Abbildung 2.3 zu sehen ist, sind ausgehend von der Hand und den Augen unterschiedliche Bereiche eines Objekts sichtbar. Nur dort, wo sich beide Bereiche überschneiden, ist eine zuverlässige Selektion möglich, weil hier erkennbar ist, dass sich der Lichtstrahl und das Objekt schneiden. Dieser Bereich wird entsprechend kleiner, je näher sich das Objekt an dem/der Nutzer/in befindet und je weiter die Hand von den Augen entfernt ist. Das zweite Problem kann auftreten, wenn das Zielobjekt von einem anderen Objekt überdeckt wird. Hier kann es sein, dass das Objekt zwar sichtbar ist, aber von der Hand aus nicht mit einem Lichtstrahl erreichbar ist und somit nur ein Positionswechsel der Hand es ermöglicht, das Objekt mit dem Lichtstrahl zu treffen. Umgekehrt kann es auch sein, dass das Objekt zwar vom Lichtstrahl getroffen

werden kann, aber nicht sichtbar ist, was entsprechend zu Fehlselektionen führen kann, wenn versehentlich das verdeckte Objekt ausgewählt wird.

Clutching

Wie in Kapitel 2.2.1 bereits angesprochen, ist die Interaktion im dreidimensionalen Raum durch die Eigenschaften des menschlichen Körpers beschränkt, wie die Armreichweite und die Drehfähigkeit von Gelenken. Diese körperlichen Beschränkungen können teilweise durch das *Clutching* umgangen werden. Hierbei kann das Körperteil, das den Cursor steuert, bewegt werden, ohne die Position des virtuellen Cursor zu beeinflussen (Hinckley et al., 1994). Dies wird in der Regel ermöglicht, indem das Objekt abgelegt wird und die Hand in der Realität zurückbewegt oder -gedreht wird, um das Objekt dann erneut zu greifen und zu bewegen. Dies muss allerdings von der Interaktionstechnik unterstützt werden und kann sich negativ auf die Performance der Technik auswirken. Clutching bedeutet, dass Bewegungen verschwendet werden (LaViola et al., 2017), was frustrierend für die Nutzenden sein kann, wenn es zu häufig durchgeführt werden muss (Poupyrev et al., 2000). Bestimmte Techniken versuchen, die Notwendigkeit für das Clutching zu reduzieren, indem z.B. Bewegungen beschleunigt werden.

2.2.4 VR-Anwendung

Die virtuelle Umgebung, die dort vorhandenen Objekte und die durchführbaren Aufgaben unterscheiden sich stark zwischen verschiedenen VR-Anwendungen. Jede Anwendung definiert spezifische Anforderungen an die Interaktionstechniken. Techniken, die in einem Szenario schnell und präzise arbeiten, können ungeeignet für andere Szenarien sein. In diesem Abschnitt soll auf Charakteristiken von VR-Anwendungen eingegangen werden, die hierbei eine Rolle spielen können.

Durchzuführende Aufgaben

Wie eingangs erwähnt, wird sich in dieser Arbeit auf die elementaren Aufgaben Selektion, Positionierung, Rotation und Skalierung beschränkt. Aber auch diese Teilmenge an Aufgaben kann eine hohe Variation aufweisen und nicht jede Interaktionstechnik unterstützt jeden Aufgabentyp. Die Aufgaben können sich hinsichtlich vieler Aspekte unterscheiden. Neben dem Aufgabentyp an sich kann es z.B. auch erforderlich sein, mehrere Arten der Manipulation gleichzeitig durchzuführen. Aber auch der Manipulationsgrad kann einen Einfluss haben (Poupyrev et al., 1997). Je nach Aufgabentyp entscheidet dieser, wie weit das Objekt zur Zielposition bewegt werden muss, wie stark die durchzuführende Rotation ist oder um welchen Faktor Objekte verkleinert bzw. vergrößert werden müssen. Auch die Achsen, auf denen die Manipulation durchgeführt werden muss, kann von Interaktionstechniken unterschiedlich gut unterstützt werden (Samini & Palmerius, 2017). Schlussendlich kann auch die nötige Präzision ein Einflussfaktor sein (LaViola et al., 2017).

Entwickelnde stehen vor der Wahl, Interaktionstechniken zu wählen, die auf eine Aufgabe spezialisiert sind oder mehrere Aufgaben unterstützen. Dies wird auch als Ausdrucksstärke der Interaktionstechnik bezeichnet (Bowman, 2002). Ersteres verlangt von den Nutzenden, sich an verschiedene Interaktionstechniken zu gewöhnen, wenn mehrere Aufgaben in einer Anwendung durchgeführt werden müssen und Letzteres birgt die Gefahr, dass nicht alle Aufgaben im ausreichendem Maße von einer einzigen Technik unterstützt werden (Frees, 2010).

Objekteigenschaften

Erwartungsgemäß haben bei der Interaktion mit virtuellen Objekten die Eigenschaften dieser eine starke Auswirkung auf die Performance von Interaktionstechniken. Die Größe und die Entfernung von Objekten spielen insbesondere bei der Selektion von Objekten eine tragende Rolle (Bowman, 1999) und werden häufig in Studien als unabhängige Variablen verwendet (Weise & Zender, 2019). Wie bereits in Kapitel 2.1.3 angesprochen, haben diese beiden Eigenschaften einen direkten Bezug zu Fitts' Law. Kleine Objekte sind entsprechend schwieriger zu selektieren, da sie weniger Fläche bieten, um den Cursor mit dem Objekt zu überlagern. Ein ähnlicher Effekt tritt bei entfernten Objekten auf, die indirekt kleiner werden und weniger perspektivische Merkmale aufweisen. Die Kombination aus Größe und Entfernung wird auch häufig als visuelle Größe bezeichnet (Wingrave & Bowman, 2005). Auch bei der Manipulation von Objekten spielen diese Faktoren eine Rolle, da Interaktionstechniken beispielsweise Mechanismen bieten müssen, um Objekte außerhalb der Reichweite der Nutzenden verändern zu können. Auch die Ausrichtung zum Zielobjekt, also ob dieses sich links oder rechts von der Position des/der Nutzer/in befindet, kann Auswirkungen auf die Performance einer Interaktionstechnik haben. Zwar wird dieser Faktor selten untersucht (Weise & Zender, 2019), doch zeigen Studien entsprechende Ergebnisse (siehe z.B. Grossman und Balakrishnan (2006); Wingrave und Bowman (2005)). Weitere relevante optische Faktoren sind die Form und Farbe eines Objekts. Die Form kann indirekt die Größe und damit die Fläche, die für die Selektion durch den Cursor zur Verfügung steht, beeinflussen und bei einer unregelmäßigen Form kann das Objekt unterschiedliche Größen aus unterschiedlichen Perspektiven aufweisen. Sich bewegendende Objekte können insbesondere die Selektion erschweren, da es entsprechend schwer sein kann den Cursor zum Zeitpunkt der Selektion auf dem Objekt zu halten.

Mehrere Objekte

In der Regel befinden sich mehrere Objekte in einer virtuellen Umgebung, die es erschweren, das richtige Objekt auszuwählen. Dabei kann die Anzahl der Objekte ein Kriterium für den Schwierigkeitsgrad sein (Samini & Palmerius, 2017). Insbesondere hat dies Auswirkungen auf die Objektdichte und somit auf den zur Verfügung stehenden Platz zwischen den Objekten. Einander sehr nahe Objekte bergen die Gefahr, versehentlich das falsche Objekt auszuwählen. Dies kann dazu führen, dass sich Objekte gegenseitig verdecken. Dadurch kann die sichtbare Fläche des Zielobjekts verkleinert werden, und somit weniger Raum für den Cursor bieten.

2.3 Kriterien für die Eignung von Interaktionstechniken

Um Interaktionstechniken hinsichtlich ihrer Performance in unterschiedlichen Szenarien vergleichen zu können, müssen Kriterien angesetzt werden, mit deren Hilfe die Eignung einer Technik bewertet werden kann. In diesem Abschnitt soll auf mögliche Eignungskriterien eingegangen werden. Diese werden dabei hinsichtlich der beiden zentralen Konzepte der Mensch-Computer-Interaktion *Usability* und *User Experience* unterschieden (Hartson & Pyla, 2012; Shneiderman, 2014).

2.3.1 Usability

Die Usability eines Produktes, Systems oder, wie in diesem Fall, einer Interaktionstechnik kann als Gebrauchstauglichkeit oder Benutzerfreundlichkeit verstanden werden. Nach der ISO Norm 9241-11 beschreibt die Usability „das Ausmaß, in dem ein Produkt durch bestimmte Benutzer in einem bestimmten Nutzungskontext genutzt werden kann, um bestimmte Ziele effektiv, effizient und zufriedenstellend zu erreichen“ (Deutsches Institut für Normung e.V., September 2018). Nach Shneiderman (2014) können die folgenden Kriterien angesetzt werden, um die Usability zu erfassen:

1. *Erlernbarkeit*: Wie lange benötigt ein/eine typische/r Vertreter/in der Zielgruppe zum Erlernen relevanter Aktionen für die Durchführung einer Reihe von Aufgaben.
2. *Geschwindigkeit*: Wie viel Zeit wird für die Durchführung von Vergleichsaufgaben benötigt?
3. *Fehlerrate*: Wie viele und welche Art von Fehlern werden bei der Durchführung von Vergleichsaufgaben gemacht?
4. *Beständigkeit*: Wie gut können Nutzende ihre Kenntnisse über verschiedene Zeiträume (Stunden, Tage oder Wochen) behalten? Die Beständigkeit kann eng mit der Erlernbarkeit in Verbindung stehen und auch die Häufigkeit der Nutzung kann eine wichtige Rolle spielen.
5. *Subjektive Zufriedenheit*: Wie werden verschiedene Aspekte des Interface durch die Nutzenden empfunden?

Es ist schwierig, alle Kriterien vollständig zu erfüllen (Shneiderman, 2014). Manche Interaktionstechniken nutzen komplexere Funktionalitäten, um die Interaktion zu beschleunigen, die allerdings zusätzliche Zeit zum Erlernen benötigen (Sanz, 2011). Auch das Anwendungsszenario kann Einfluss darauf haben, ob die Interaktionstechniken z.B. schnell erlernbar sein müssen oder eine hohe Geschwindigkeit bei der Durchführung der Aufgaben höhere Priorität hat. Im Folgenden wird genauer auf die genannten Kriterien eingegangen und es werden Möglichkeiten zur Erfassung von diesen genannt, wobei kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben wird.

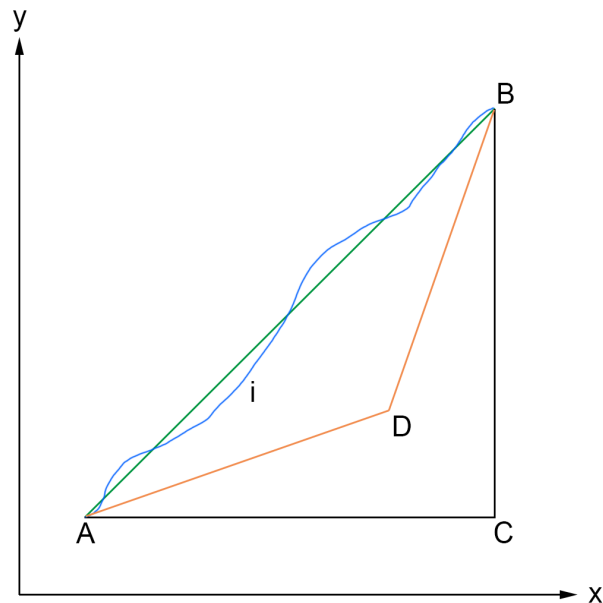


Abbildung 2.4: Verschwendete Arbeit anhand der Positionierung eines Objekts in 2D (nach Zhai und Milgram (1998)).

Die Erlernbarkeit einer Interaktionstechnik bezieht sich darauf, wie schnell unerfahrene Nutzende eine Interaktionstechnik verstehen und beginnen können, mit dieser Technik zu interagieren (Bowman, 1999). Um die Erlernbarkeit zu bewerten, kann die Einschätzung der Nutzenden verwendet oder die Zeit bis zum Erreichen bestimmter Leistungsanforderungen ermittelt werden. Ein weiteres Hilfsmittel kann die Performance-Steigerung von unerfahrenen Nutzenden über die Zeit hinweg sein (Bowman, 2002). Die Natürlichkeit einer Interaktionstechnik und die Übertragbarkeit der Interaktion auf eine Metapher aus der realen Welt können die aufgebrauchte Zeit zum Erlernen einer Technik verringern (LaViola et al., 2017).

Die ISO Norm 9241-11 nennt die Effektivität als ein Merkmal der Usability und definiert diese als „die Genauigkeit und Vollständigkeit, mit der Benutzer ein bestimmtes Ziel erreichen“ (Deutsches Institut für Normung e.V., September 2018). Im Kontext von Interaktionstechniken dienen die Geschwindigkeit und Präzision als zwei der wichtigsten Kriterien für die Erfassung der Effektivität (Bowman, 2002). Die Geschwindigkeit kann ermittelt werden, indem die benötigte Zeit zur Durchführung einer Aufgabe erfasst wird (siehe z.B. Periverzov und Ilies (2015)) oder die Anzahl an vollständigen Aufgabendurchführungen in einem festgelegten Zeitfenster bestimmt wird (siehe z.B. Frees et al. (2007)). Die Präzision gibt an, wie exakt eine Aufgabe mit der gegebenen Interaktionstechnik durchgeführt werden kann (Bowman, 2002). Bei Manipulationsaufgaben kann z.B. erfasst werden, wie stark die Position, Rotation und/oder Objektgröße von der Zielvorgabe abweicht. Bei der Selektion von Objekten kann gemessen werden, wie häufig ein falsches Objekt oder gar kein Objekt anstatt des Ziels ausgewählt wurde. Der bereits beschriebene Speed-Accuracy Tradeoff kann dazu führen, dass zwar eine sehr geringe Fehlerrate erreicht wird, dafür aber entsprechend mehr Zeit bei der Interaktion benötigt wird. Wie bereits in Kapitel 2.1.4 beschrieben, ist es schwer, Geschwindigkeit und Präzision gleichzeitig zu erfassen.

Auch die Effizienz wird in der ISO Norm 9241-11 als wichtiges Kriterium für die Usability genannt und als „der im Verhältnis zur Genauigkeit und Vollständigkeit eingesetzte Aufwand, mit dem Benutzer ein bestimmtes Ziel erreichen“ definiert (Deutsches Institut für Normung e.V., September 2018). Entsprechend wird in dieser Arbeit der nötige Aufwand für die Durchführung einer Aufgabe mit einer Interaktionstechnik als Effizienz dieser Technik verstanden. Dabei steht im Allgemeinen der physische Aufwand im Vordergrund. Zhai und Milgram (1998) nutzen z.B. die Abweichung einer durchgeführten Bewegung vom optimalen Pfad als Metrik für die Effizienz. Abbildung 2.4 stellt beispielhaft die Bewegung eines Objekts von A nach B in 2D dar. Der kürzeste Weg führt direkt von A nach B . Zhai und Milgram (1998) definieren die „verschwendete Arbeit“ wie folgt:

$$\frac{\text{Länge des tatsächlichen Pfades} - \text{Länge des kürzesten Pfades}}{\text{Länge des kürzesten Pfades}}$$

Eine Technik, die die Positionierung von Objekten auf nur einer Achse gleichzeitig erlaubt, müsste über C gehen und nach dieser Formel somit am schlechtesten abschneiden. Ein Weg über D würde ein besseres Ergebnis liefern, aber am nächsten am direkten Weg liegt Pfad i , der zu einer Technik gehören könnte, die die Positionierung auf allen Achsen gleichzeitig ermöglicht. Analog kann bei der Rotation die Abweichung der durchgeführten Drehung von der optimalen erfasst werden. Auf ähnliche Weise gibt die m -Metrik die Verteilung der Bewegung auf die verschiedenen Freiheitsgrade an (Masliah & Milgram, 2000). Der *Input Device Footprint* kann ebenfalls verwendet werden, um die nötigen Bewegungen, die mit einem Eingabegerät bei der Nutzung verschiedener Interaktionstechniken durchgeführt werden müssen, miteinander zu vergleichen (siehe z.B. Vanacken et al. (2009)).

Die subjektive Zufriedenheit mit einer Interaktionstechnik kann von vielen Faktoren abhängen. So kann die Komplexität einer Interaktionstechnik einen Einfluss haben, die in Verbindung zur erfahrenen kognitiven Belastung bei deren Nutzung steht (Bowman, 2002). Aber auch die physischen Anforderungen, die an die Nutzenden gestellt werden, können die Zufriedenheit beeinflussen. Bereits im Kapitel 2.2.1 wurde darauf eingegangen, dass das lange Verharren in ungewohnten Positionen schnell zur Ermüdung der Gliedmaßen führen kann. Ebenso kann auch die kognitive Belastung einen Einfluss auf die Nutzbarkeit von Interaktionstechniken haben. Die Anforderungen, die von der Interaktionstechnik und der zu erfüllenden Aufgabe ausgehen, wird oft mit dem NASA Task Load Index (TLX) (Hart & Staveland, 1988) abgefragt. Auch Motion Sickness kann sich entsprechend negativ auf die Nutzerzufriedenheit auswirken. Diese tritt vor allem auf, wenn der Körper sich widersprechende Sinneseindrücke erfährt (z.B. wenn die Augen eine Fortbewegung suggerieren, aber das Gleichgewichtsorgan das Stehen auf der Stelle vermittelt) (LaViola et al., 2017). Neben der objektiv erfassten Geschwindigkeit und Präzision kann auch die subjektiv empfundene Geschwindigkeit und Präzision Rückschlüsse auf die Zufriedenheit der Nutzenden liefern und wird häufig in Studien erfasst (Samini & Palmerius, 2017). Die subjektiven Einschätzungen der Nutzenden können auf qualitativen oder quantitativen Weg ermittelt werden. Hierzu seien die Fragebögen Questionnaire for User Interface Satisfaction (QUIS) (Chin et al., 1988), Software Usability Measurement Inventory (SUMI) (Sauro & Lewis, 2009) und System Usability Scale (SUS) (Brooke, 1996) genannt.

2.3.2 User Experience

Nach ISO Norm 9241-210 umfasst User Experience die „Wahrnehmungen und Reaktionen einer Person, die aus der tatsächlichen und/oder der erwarteten Benutzung eines Produkts, eines Systems oder einer Dienstleistung resultieren. User Experience umfasst sämtliche Emotionen, Vorstellungen, Vorlieben, Wahrnehmungen, physiologische und psychologische Reaktionen, Verhaltensweisen und Leistungen, die sich vor, während und nach der Nutzung ergeben“ (Deutsches Institut für Normung e.V., März 2020). Somit schließt die User Experience die Usability mit ein, betrachtet aber zusätzlich ästhetische und emotionale Aspekte, wie die Bedeutsamkeit und den Spaß der Interaktion, und erlaubt eine ganzheitliche Betrachtung der Interaktion (Hartson & Pyla, 2012). Im Speziellen ordnen Hartson und Pyla (2012) der User Experience folgende Faktoren zu:

1. *Usability*: Produktivität, Effizienz, Nutzbarkeit und Erlernbarkeit (siehe Kapitel 2.3.1).
2. *Nützlichkeit*: Die Fähigkeit, das System oder das Produkt zu benutzen und die Ziele zu erreichen.
3. *Emotionaler Einfluss*: Affektive Komponenten der Nutzererfahrung, der Gefühle der Nutzenden und der Nutzerzufriedenheit.
4. *Bedeutsamkeit*: Beziehung zum Produkt über einen längeren Zeitraum.

Insbesondere der emotionale Einfluss spielt eine tragende Rolle bei der User Experience. Dieser kann durch verschiedenste Aspekte, wie z.B. Aufregung, Neuheit oder empfundene Ästhetik, ermittelt werden (Hartson & Pyla, 2012). Oft wird bei der Evaluation von Interaktionstechniken auch der Spaß als Kriterium für die User Experience erfasst (siehe z.B. Katzakakis et al. (2013); Mendes et al. (2016)). Ebenso ist die gefühlte Präsenz der Nutzenden ein wichtiger Faktor bei VR-Anwendung und kann durch die Interaktionstechnik beeinflusst werden (Bowman, 2002). Präsenz kann als das Gefühl verstanden werden, sich in einer Umgebung anwesend zu fühlen und diese als primären Handlungsrahmen zu verstehen (Steuer, 1992). Die Präsenz kann durch spezifische Fragebögen erfasst werden (siehe z.B. Slater et al. (1994)). Zur Ermittlung der User Experience im Allgemeinen wurde ebenfalls eine Vielzahl von Fragebögen entwickelt. Zu den bekanntesten zählen der User Experience Questionnaire (Laugwitz et al., 2006) und der meCUE (Minge & Riedel, 2013).

2.4 Verwandte Arbeiten

Wie bereits im Kapitel 1.2 angesprochen, wurden im Rahmen dieser Arbeit eine Taxonomie, die die Betrachtung von Interaktionstechniken hinsichtlich ihrer Eigenschaften erlaubt, sowie ein Werkzeug zur Unterstützung der Auswahl von Interaktionstechniken erstellt. Im Folgenden sollen verwandte Arbeiten betrachtet werden, um eine Abgrenzung, aber auch die Nutzung bisheriger Erkenntnisse zu ermöglichen. Für eine Übersicht von Studien, in denen Interaktionstechniken miteinander verglichen wurden, wird auf eine vorangegangene systematische Literaturanalyse verwiesen (Weise & Zender, 2019).

2.4.1 Klassifikationen und Taxonomien

Es sind bereits einige Taxonomien und Klassifikation zu Interaktionstechniken entstanden, die sich aber meist nur auf wenige Teilaspekte konzentrieren. Diese Vorarbeiten stellen dennoch eine wichtige Grundlage für die in dieser Arbeit präsentierte Taxonomie dar. Aus diesem Grund soll im Folgenden ein Einblick in diese Arbeiten und deren Grenzen gegeben werden.

Bowman und Hodges (1999) haben eine Taxonomie entwickelt, in der der Prozess der Interaktion mit virtuellen Objekten in die drei Teilaufgaben *Auswahl*, *Manipulation* und *Loslassen* unterteilt wird. Dabei werden verschiedene Charakteristiken von Techniken mit einbezogen, wie z.B. das zurückgegebene Feedback, die Art der Indikation des Zielobjekts bei der Selektion oder die Art der Abbildung von realen Bewegungen auf die virtuelle Positionsänderung eines Objekts. Die Taxonomie ermöglicht eine umfangreiche Klassifizierung von Techniken, wobei einige wichtige Merkmale fehlen. Da sich diese Taxonomie stark auf die genannten Teilaufgaben konzentriert, fehlen z.B. Eigenschaften, die unabhängig von diesen sind, wie die Reichweite oder die Natürlichkeit einer Technik.

Poupyrev und Ichikawa (1999) klassifizieren Techniken hinsichtlich der zugrundeliegenden Metaphern, die aus der echten Welt bekannt sind. Dabei wird zwischen *exozentrischen* (Ansicht von außen) und *egozentrischen* (Ansicht von innen) Techniken unterschieden. Die egozentrischen Techniken werden weiter unterteilt in die Metaphern *Virtual Hand* und *Virtual Pointer*. Diese ermöglichen die Interaktion mit Objekten, indem die realen Bewegungen auf einen virtuellen Cursor abgebildet werden oder durch das Zeigen auf Objekte. LaViola et al. (2017) erweitern diesen Ansatz durch die Metaphern *Greifen*, *Zeigen*, *Oberfläche*, *Indirekt* und *Zweihändige Interaktion*. Die Einteilung nach Metaphern ist sinnvoll, um die grundlegende Funktionsweise von Techniken zu verstehen, und wird auch in der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Taxonomie aufgegriffen. Darüber hinaus gibt es allerdings noch weitere Charakteristiken, die Techniken, auch wenn sie auf der gleichen Metapher basieren, in der Nutzung stark unterschiedlich wirken lassen. LaViola et al. (2017) geben außerdem einen guten Überblick über eine Vielzahl von möglichen Eigenschaften einer Interaktionstechnik. Dies ist in einige Dimensionen der im Rahmen dieser Arbeit erstellten Taxonomie eingeflossen.

Mendes et al. (2017) haben eine Klassifikation für Selektionstechniken entwickelt. Diese besteht aus den Eigenschaften *Reichweite*, *Kardinalität* (Anzahl selektierbarer Objekte) und *schrittweise Reduzierung* (Auflösen von Mehrdeutigkeiten). Hierdurch ist es möglich, einzuschätzen, ob eine Technik für eine bestimmte Selektionsaufgabe geeignet ist. Sollen z.B. Objekte auf einer größeren Distanz selektiert werden, können nur Techniken verwendet werden, die eine entsprechende Reichweite unterstützen. Die Klassifikation ist allerdings nur für Selektionstechniken nutzbar und es gibt noch weitere Faktoren, die die Verwendbarkeit einer Technik für eine spezifische Aufgabe einschränken. Argelaguet und Andujar (2013) veröffentlichten eine etwas umfassendere Klassifikation von Selektionstechniken. Dabei werden das *Selektionswerkzeug*, die *Freiheitsgrade*, der *Disambiguierungsmechanismus*, die *Abbildungsfunktion* und die *Beziehung zwischen motorischem und visuellem Raum* miteinbezogen. Dadurch ist eine tiefere Analyse von Selektionstechniken möglich. Aber auch hier fehlen wichtige Eigenschaften von Interaktionstechni-

ken, wie die Reichweite oder verwendete Constraints, und die Klassifikation ist ebenfalls auf Selektionstechniken beschränkt.

Mendes et al. (2019) haben eine detaillierte Klassifikation für Manipulationstechniken erstellt. Hier wird in *Eigenschaften der Umgebung*, zu denen z.B. die Anzahl der erfassten Hände und die Freiheitsgrade zählen, und *Transformationen* unterschieden. Als Transformationen werden die Veränderungen der Eigenschaften von Objekten hinsichtlich Position, Rotation und Skalierung verstanden, die hier auch separat hinsichtlich verschiedener Faktoren, wie z.B. *Abbildungsfunktion*, *Anzahl der Kontaktpunkte* und der *unterstützten Freiheitsgrade*, betrachtet werden. Auf einige dieser Charakteristiken wird in der später vorgestellten Taxonomie Bezug genommen, aber die Klassifikation überschneidet sich in einigen Bereichen und es werden nur Manipulationstechniken betrachtet.

Die beschriebenen Taxonomien und Klassifizierungen ermöglichen die grundlegende Einteilung von Interaktionstechnik, aber betrachten meist nur eine kleine Anzahl an Charakteristiken. Darüber hinaus werden Selektions- und Manipulationstechniken oft dediziert betrachtet und hinsichtlich spezifischer Eigenschaften kategorisiert. Diese Vorgehensweise macht durchaus Sinn, da hierdurch eine spezifische Perspektive eingenommen wird und wichtige Teilaspekte der Techniken berücksichtigt werden. Die hier vorgestellte Taxonomie soll allerdings eine umfassendere Klassifikation von Interaktionstechniken ermöglichen, wobei die genannten Arbeiten als Basis genutzt und erweitert werden. So ist es möglich, Techniken eingehender als bisher hinsichtlich ihrer spezifischen Eigenschaften zu untersuchen und miteinander zu vergleichen. Zusammen mit den Anforderungen einer Anwendung an die Ein- und Ausgabegeräte, die virtuelle Umgebung und die durchführbaren Aufgaben wird so eine initiale Einschätzung der Eignung einer Interaktionstechnik für das jeweilige Anwendungsszenario ermöglicht.

2.4.2 Existierende Unterstützungen für die Auswahl von Interaktionstechniken

Passende Interaktionstechniken für eine zu entwickelnde VR-Anwendung zu finden kann herausfordernd sein, da die Eignung einer Technik von vielen Faktoren abhängt (siehe Kapitel 2.2). Neben Taxonomien stehen Entwicklenden viele Hilfsmittel zur Verfügung, die hier unterstützen können. Richtlinien geben Hinweise auf bekannte Probleme bei der Interaktion und deren Lösungen. Techniken können allerdings auch zur Laufzeit abhängig vom aktuellen Anwendungskontext oder Nutzerpräferenzen ausgewählt bzw. angepasst werden. Nicht zuletzt stehen Werkzeuge zur Verfügung, die auf die Anwendung angepasste Hilfestellung geben können. Auf diese Hilfsmittel soll im Folgenden eingegangen werden, um darauf aufbauend die Entwicklung eines weiteren Unterstützungswerkzeugs motivieren zu können.

Richtlinien

Richtlinien ermöglichen bei der Entwicklung von Anwendungen, auf Forschungsergebnisse und Erfahrungen anderer Entwickelnder zurückzugreifen, um so bereits im Gestaltungs-

prozess unnötige Fehler zu vermeiden. Im Folgenden sollen einige Arbeiten, aus denen Richtlinien hervorgegangen sind, vorgestellt werden.

Gabbard (1997) hat Hinweise und Überlegungen zu einer Vielzahl von Aspekten der Interaktion in virtuellen Umgebungen aus existierenden Arbeiten zusammengetragen. Diese beziehen sich auf Faktoren, wie Nutzende, spezifische Aufgaben, wie Fortbewegung, Selektion und Manipulation, das Verständnis der Nutzenden von der Umgebung, Eingabemechanismen und Formen von Feedback. Die Richtlinien umfassen grundlegende Anmerkungen, wie die Unterstützung von Links- und Rechtshändern, bis zu spezifischen Hinweisen, wie der Integration von Clutching-Mechanismen, wenn viel mit dem Handgelenk rotiert werden muss.

Bowman (2002) hat eine Sammlung von Richtlinien zusammengestellt, die sich aus Ergebnissen empirischer Evaluationen und eigenen Erfahrungen, die in vorangehenden Arbeiten diskutiert werden (Bowman, 1999; Bowman et al., 1999; Bowman, Kruijff et al., 2001), zusammensetzen. Dazu zählen allgemeine Richtlinien, wie die Verwendung von Eingabegeräten mit der entsprechenden Anzahl an Freiheitsgraden. Bowman gibt außerdem Hinweise zu den Aufgabentypen Fortbewegung, Selektion, Manipulation und Systemkontrolle. Beispielsweise wird vorgeschlagen, die *Virtual Hand* Technik zu verwenden, wenn eine Selektion in Armreichweite durchgeführt werden soll, und Ray-Casting bei größeren zu überbrückenden Distanzen. Des Weiteren sollten die Freiheitsgrade bei der Manipulation reduziert werden, wenn es die Anwendung erlaubt.

Mendes et al. (2019) tragen auf Basis von aktuellen Trends und der Betrachtung verschiedener Techniken Richtlinien und Überlegungen für die Umsetzung von 3D-Interaktion zusammen. Beispielsweise wird der Hinweis gegeben, dass eine exakte Abbildung eine natürliche Interaktion ermöglicht, aber auch die Fortbewegungen der Nutzenden erfordert, um entfernte Ziele zu erreichen. Darüber hinaus kann das Separieren von Translationen die Präzision erhöhen und unnötige Bewegungen verhindern, aber der nötige Wechsel zwischen verschiedenen Modi kann insbesondere bei komplexen Aufgaben ineffektiv und ungewollt sein. Es wird außerdem auf offene Forschungsfelder, wie das Finden einer vertrauten Metapher für eine präzise Interaktion oder die angenehme Skalierung von Objekten auf 1 oder 2 Achsen, eingegangen.

Es gibt weitere Arbeiten, die Richtlinien auf Basis durchgeführter Evaluationen (siehe z.B. Bossavit et al. (2014); Ren und O'Neill (2013)) erstellen oder diese für die Entwicklung einer neuen Technik verwenden (siehe z.B. Lévesque et al. (2013); Vanacken et al. (2009)). Auch Standardwerke zur Interaktion im dreidimensionalen Raum (LaViola et al., 2017) und Virtual Reality (Jerald, 2016) liefern viele Hinweise für die Entwicklung und Auswahl von Interaktionstechniken.

Bei der Verwendung von Richtlinien ist zu beachten, dass diese teilweise vor längerer Zeit erstellt wurden. Insbesondere im VR-Bereich können diese aufgrund der schnellen Weiterentwicklung der verwendeten Hard- und Software schnell überholt sein. Richtlinien sollten außerdem nicht als gesetzt verstanden werden, sondern immer im Kontext der eigenen Anwendung betrachtet werden. Das Umsetzen jeder Richtlinie bedeutet nicht zwangsläufig eine Steigerung der Nutzbarkeit der Anwendung. Gabbard (1997) schlägt beispielsweise vor, dass man die Veränderung von Objektattributen erlauben soll (z.B. Farbe, Form und Bezeichnung), was nicht in jeder Anwendung nötig ist.

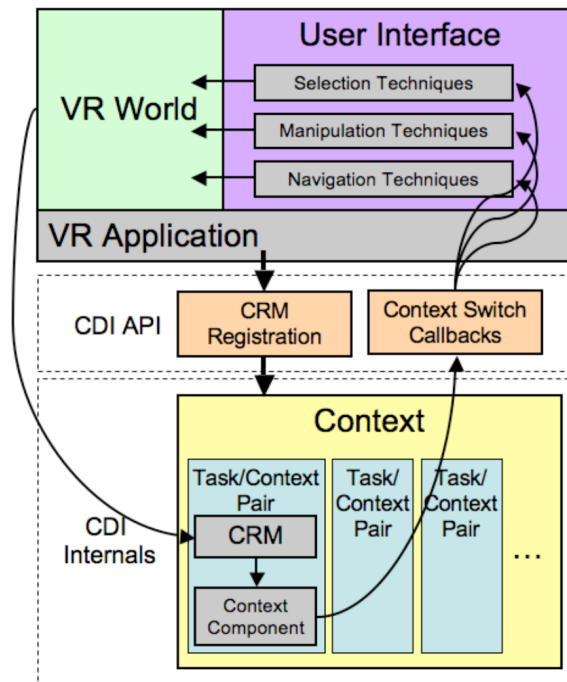


Abbildung 2.5: Aufbau des Context-Driven Interaction Toolkit (Frees, 2010).

Ein weiteres Problem ist, dass die große Anzahl an existierenden Richtlinien Entwickelnde schnell überfordern können (Nielsen, 1993). Insbesondere für die Evaluierung einer fortgeschrittenen Anwendung kann es zeitintensiv und nicht zielführend, sein diese hinsichtlich der Einhaltung einer hohen Anzahl an Richtlinien zu überprüfen. Hierfür schlägt Nielsen (1993) Heuristiken vor, wobei es sich um eine reduzierte Liste an Regeln handelt, auf Basis derer Experten eine Anwendung hinsichtlich möglicher Probleme überprüfen, auf die auch Nutzende stoßen könnten. Diese können auch anhand von Richtlinien erstellt worden sein. Die heuristische Evaluierung ist eine schnelle und kostengünstige Methode, die Benutzerfreundlichkeit einer Anwendung zu überprüfen. Sutcliffe und Gault (2004) haben einige Heuristiken entwickelt, die sich nicht nur auf die Interaktion fokussieren, sondern auch die allgemeine Gestaltung der Anwendung miteinbeziehen. Insbesondere steht hier Natürlichkeit im Fokus und dass Erwartungen an die virtuelle Welt auf Basis der Erfahrungen aus der echten Welt erfüllt werden.

Automatische Auswahl und Adaption

Eine Möglichkeit, die zur Verfügung stehenden Interaktionstechniken dynamisch an die Bedürfnisse der Nutzenden oder der Anwendung anzupassen, ist ein Automatismus zur Laufzeit. Frees (2010) haben z.B. ein Framework mit Namen *Context-Driven Interaction (CDI) Toolkit* entwickelt, das den automatischen Wechsel von Techniken auf Basis des aktuellen Anwendungskontextes ermöglicht. Der Aufbau des Frameworks ist in Abbildung 2.5 zu sehen. Die API-Ebene ermöglicht dabei die Registrierung von Mechanismen, die zur Veränderung des Kontextes führen, und Callbacks, die aufgerufen werden, wenn sich der Kontext ändert. Die interne Ebene verwaltet die Kontextkomponenten und ruft die Callbacks bei entsprechender Kontextänderung auf. Der Kontext der Interaktion beinhaltet den aktuellen Status des/der Nutzers/Nutzerin, die Position, vergangene Interaktionen

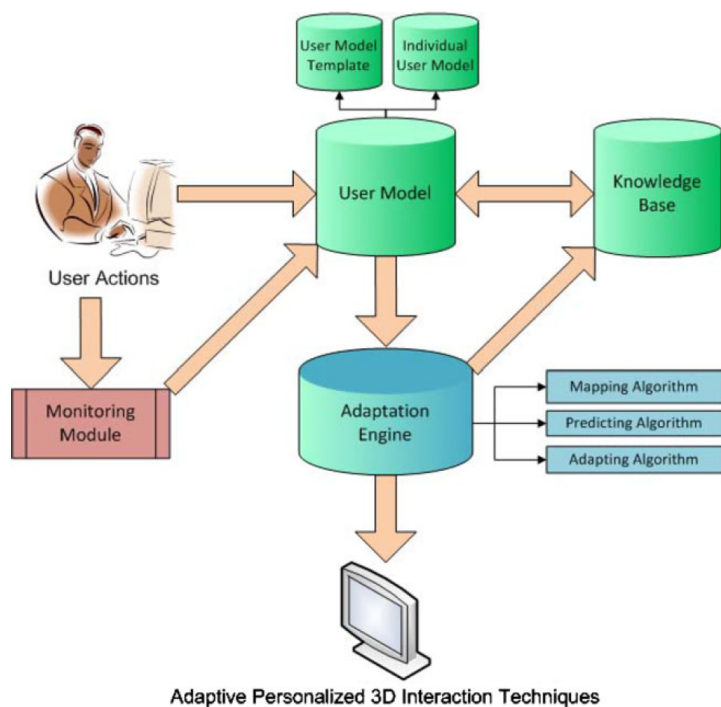


Abbildung 2.6: Aufbau des Frameworks für adaptive personalisierte Interaktionstechniken (Octavia et al., 2011).

und die Ziele bei der Durchführung der Aufgaben. Der Kontext wird durch folgende Kontextkomponenten beschrieben: *Level Of Control* (benötigte Geschwindigkeit oder Präzision), *Workspace* (Größe und Position des Zielbereichs), *Frame of Reference* (Objekt, das im Fokus steht), *Object Groupings* (relevante Objektgruppen) und *Constraints* (relevante Beschränkungen). Diese Kontextkomponenten werden bestimmten Aufgaben zugewiesen, wie z.B. Selektion, Rotation und Positionierung, die für die Komponenten relevant sind. Die Komponente *Workspace* ist z.B. relevant für die Selektion, sodass auf kurze Distanz die *Virtual Hand* Technik verwendet werden könnte und auf größere Distanz *Ray-Casting*.

Octavia et al. (2011) haben ein konzeptionelles Framework entwickelt, das die Auswahl oder Anpassung von Interaktionstechniken auf Basis von Eigenschaften und Präferenzen der Nutzenden ermöglicht. Dabei soll auch die Variation von visuellen, auditiven und haptischen Feedback ermöglicht werden. Abbildung 2.6 zeigt den Aufbau des Frameworks. Im Zentrum stehen Nutzermodelle, die Informationen und Annahmen über die Interaktionsmuster, Vorlieben, Interessen und Charakteristiken der Nutzenden enthalten. Diese werden auf Basis der Aktionen der Nutzenden in der virtuellen Umgebung erzeugt und angepasst und über das *Monitoring Module* erfasst. Informationen zu vergangenen Interaktionen und Anpassungen werden in der *Knowledge Base* abgelegt. Die *Adaptation Engine* kümmert sich entsprechend um die Anpassung der zur Verfügung stehenden Techniken oder der Technik selbst. Dabei werden die Algorithmen *Mapping Algorithm* (Anbieten von Techniken auf Basis des aktuellen Kontextes), *Prediction Algorithm* (Aktivieren und Deaktivieren von Techniken auf Basis von Vorhersagen) und *Adapting Algorithm* (Technik durch andere Modalitäten anpassen) verwendet. Octavia et al. (2011) haben sich in der Arbeit vor allem auf die Erstellung eines ersten Nutzermodells fokussiert und positive Resultate mit dem automatischen Wechseln zwischen Techniken auf Grundlage des Modells erfahren.

Abbildung 2.7: Bewertung einer Anwendung mit MAUVE auf Basis von Heuristiken (Stanney et al., 2003).

Das von Cashion et al. (2013) entwickelte Framework ermöglicht die automatische Auswahl von Selektionstechniken. Hierfür wird ein *Analyzer* verwendet, der auf Basis der aktuellen Gegebenheiten die passende Interaktionstechnik auswählt. Als Auswahlkriterien werden die Geschwindigkeit des Cursors und die Anzahl der Objekte im Cursor verwendet. Die Techniken müssen entsprechend zuvor hinsichtlich ihrer Eignung in Umgebungen mit dynamischen Objekten und hoher Objektdichte überprüft werden.

Die Herausforderung bei derartigen automatischen Systemen besteht darin, die Informationen zu identifizieren, auf Basis derer die Techniken ausgewählt oder adaptiert werden. Wie bereits in Kapitel 2.2 angesprochen, kann sich eine Vielzahl von Faktoren auf die Eignung einer Technik auswirken. Selbst wenn diese identifiziert und zur Laufzeit erfasst werden können, muss immer noch entschieden werden, welche Techniken sich in welchen Szenarien am besten eignen. Außerdem kann ein automatischer Wechsel zwischen Techniken Nutzende verwirren (Cashion et al., 2013), auch wenn wir den Wechsel eines Werkzeugs oder der Herangehensweise zur Lösung verschiedener Probleme aus der Realität kennen (Frees, 2010). Auch die Notwendigkeit, mehrere Techniken erlernen zu müssen, kann Probleme bereiten (Frees, 2010).

Unterstützungssysteme

Als Unterstützungssysteme werden in dieser Arbeit Desktop- oder Webanwendungen gesehen, die Entwickelnden von VR-Anwendungen während der Konzept- oder Implementierungsphase helfen, die Interaktionsmöglichkeiten in der Anwendung passend zu gestalten. Das von Stanney et al. (2003) entwickelte Tool *MAUVE* (Multi-criteria assessment of VE usability) verfolgt das bereits in Kapitel 2.4.2 vorgestellte Konzept der heuristischen Evaluation. Hier werden die Evaluierenden anhand verschiedener Evaluationskriterien durch den Prozess der Evaluation geführt. MAUVE ist in zwei Phasen unterteilt. In der ersten Phase werden den Evaluierenden Fragen anhand von traditionellen Usability-Heuristiken gestellt, die auf den Heuristiken von Nielsen (1993) basieren und für interaktive VR-Anwendungen angepasst wurden. Für jede Heuristik wird am Ende eine Bewertung abgegeben und es wird auf Problembereiche hingewiesen. In der zweiten Phase wird eine Hierarchie von Usability-Kriterien präsentiert, die von den Evaluierenden priorisiert werden können. So kann z.B. der Manipulation von Objekten eine höhere Priorität als der Fortbewegung zugewiesen werden. Abschließend werden Fragen zu den Usability-Kriterien auf der untersten Ebene gestellt. Abbildung 2.7 zeigt beispielhaft die Fragen zum Usability-Kriterium Fortbewegung. Für die Durchführung der zweiten Phase sollte zuvor eine Evaluation durchgeführt werden, da hier Fragen teilweise auf die Erfahrungen von Nutzenden abzielen. Die finale Bewertung setzt sich aus den Antworten zusammen, die nach der vorangegangenen Priorisierung berechnet werden.

Domingues et al. (2008) haben ein Werkzeug namens *Empirical Evaluation Assistant* (EEA) entwickelt, das es ermöglicht, frühzeitig Rückmeldung über die Usability einer Interaktionstechnik im Entwicklungsprozess zu erhalten. Dafür wird eine Wissensdatenbank verwendet, die z.B. Daten zu möglichen Metriken für die Bestimmung der Güte einer Technik, Faktoren, die die Güte einer Technik beeinflussen, VR-Systeme, Fragebögen und Studienergebnisse enthält. Diese werden von EEA verwendet, um schnell empirische Evaluationen erstellen zu können und so iterativ Interaktionstechniken zu testen und zu verbessern. Ein großes Problem hierbei ist allerdings der Ausbau der Wissensdatenbank (Domingues et al., 2008).

Noller (2016) stellt auf einer Webseite⁶ eine Sammlung von Richtlinien zur Verfügung, die aus Vorschlägen aus der Industrie, Erfahrungen von VR-Designern/Designerinnen und Experten/Expertinnen und zukünftigen Nutzenden zusammengetragen wurden. Eine der Richtlinien wurde praktisch in Form einer Interaktionstechnik umgesetzt und in einer Studie untersucht, die ebenfalls auf der Webseite beschrieben ist. Auch ein Implementierungsbeispiel wird angeboten. Die Webseite ist partizipativ gestaltet und könnte bei entsprechender Erweiterung durch Richtlinien und Implementierungsbeispiele eine zentrale Anlaufstelle für Entwickelnde werden.

Derartige Anwendungen können Entwickelnde gezielt unterstützen, indem sie auf spezifische Anforderungen der zu entwickelnden Anwendungen eingehen. Anwendungen, die im wissenschaftlichen Kontext entstanden sind, werden als Forschungssoftware bezeichnet (Scheliga et al., 2019). Forschungssoftware unterliegt meist Problemen wie unzureichende Dokumentation, fehlender Zugang und nicht leistbare Verwaltung und Unterstützung der Software, insbesondere für einen längeren Zeitraum (Katerbow & Feulner, 2018; Scheliga

⁶<https://vrguideline.org>, letzter Abruf 21.02.2021

et al., 2019). Dies ist vor allem bei den ersten beiden vorgestellten Anwendungen sichtbar, die nicht mehr auffindbar sind.

Bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Recherchen konnten keine Bestrebungen identifiziert werden, existierende Techniken in einer komprimierten und durchsuchbaren Form zur Verfügung zu stellen. Zwar werden in relevanten Fachwerken (siehe z.B. Jerald (2016); LaViola et al. (2017)) und Überblicksarbeiten (siehe z.B. Argelaguet und Andujar (2013); Mendes et al. (2019)) oft mehrere Techniken präsentiert, doch auch hier kann nicht auf alle Merkmale eingegangen werden. Außerdem fehlt eine übersichtliche Darstellung der existierenden Techniken. Aus diesem Grund wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Webanwendung umgesetzt (siehe Kapitel 5), die das Filtern von Techniken auf Basis der Dimensionen und Unterdimensionen der entwickelten Taxonomie (siehe Kapitel 3) und auch das Sortieren der in der Studie untersuchten Techniken (siehe Kapitel 4) anhand verschiedener Kriterien erlaubt.

Kapitel 3

Klassifikation von Interaktionstechniken

Ob die Verwendung einer Interaktionstechnik für ein bestimmtes Anwendungsszenario überhaupt in Betracht gezogen werden sollte, hängt von den Eigenschaften der Technik ab. Ist es beispielsweise nötig, Objekte auf einer größeren Distanz auszuwählen, sind nur Techniken nutzbar, die die Selektion von Objekten auf größerer Entfernung ermöglichen. Somit ist es nötig, die Eigenschaften zu identifizieren, in denen sich Interaktionstechniken voneinander unterscheiden und anhand derer eine objektive Bewertung der Eignung von Interaktionstechniken möglich ist. Dies bedeutet, dass existierende Interaktionstechniken gesammelt und hinsichtlich ihrer Charakteristiken untersucht werden müssen. Zu den wichtigsten Strukturen, um den Gestaltungsraum von Interaktionstechniken begreifbar zu machen, gehören Taxonomien und Klassifikationen (LaViola et al., 2017; Wingrave, 2009). Ist der Gestaltungsraum bekannt, können neue Techniken durch die Kombination verschiedener Eigenschaften erstellt werden und bestehende Techniken durch die Veränderung bestimmter Merkmale gezielt angepasst werden. Taxonomien und Klassifikationen bilden darüber hinaus eine wichtige Basis, um die Menge an bekannten und gängigen Interaktionstechniken in der Wissenschaftsgemeinschaft zu etablieren (Csisinko & Kaufmann, 2003). Zudem können Taxonomien bei der Auswertung von Studien unterstützen, in denen Techniken miteinander verglichen werden, indem die Ergebnisse auf bestimmte Komponenten einer Technik zurückgeführt werden (Bowman & Hodges, 1999). Techniken, die sich bei den verwendeten Komponenten überschneiden, können besser analysiert werden und spezifische Probleme besser verstanden werden (Jerald, 2016).

Im Rahmen dieser Arbeit wurde somit eine mehrdimensionale Taxonomie erstellt, die die Klassifizierung von Interaktionstechniken hinsichtlich ihrer Eigenschaften ermöglicht. Anhand dieser Eigenschaften soll es Entwickelnden ermöglicht werden, eine objektive Einschätzung zur Eignung einer Interaktionstechnik für ein bestimmtes Anwendungsszenario abzugeben. Im Folgenden wird auf das Vorgehen bei der Erstellung der Taxonomie eingegangen und die verschiedenen Dimensionen der Taxonomie werden erläutert. Das Kapitel schließt mit einer Diskussion zu einzelnen Aspekten der Taxonomie ab.

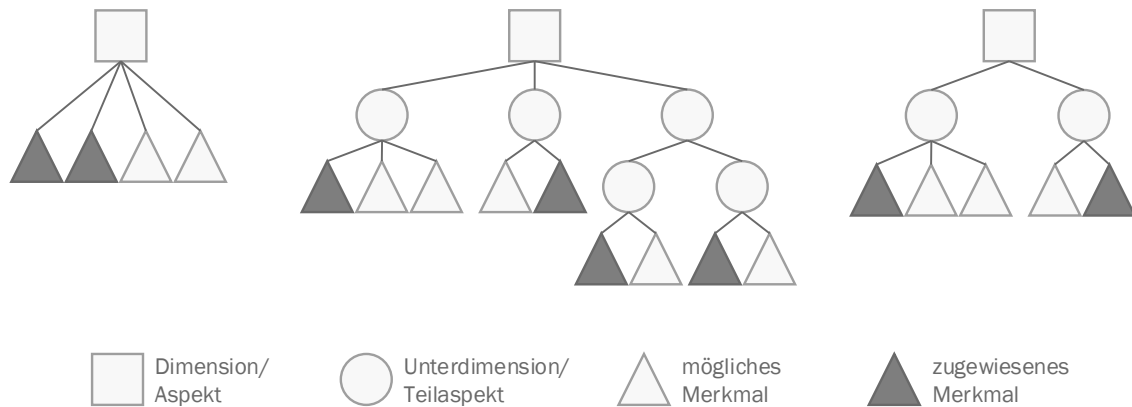


Abbildung 3.1: Beispiel einer Taxonomie mit drei Dimensionen (angelehnt an Bowman und Hodges (1999)).

3.1 Vorgehen

Eine Taxonomie ermöglicht das Unterteilen von Aspekten einer Interaktionstechnik in Teilaspekte, die wiederum in konkrete Ausprägungen münden (Bowman, 2002). Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine mehrdimensionale Taxonomie erstellt. Abbildung 3.1 stellt eine dreidimensionale Taxonomie beispielhaft dar. Die Dimensionen beschreiben Eigenschaften (in dieser Arbeit auch Aspekte genannt) einer Interaktionstechnik. Diese Dimensionen können wiederum in Unterdimensionen bzw. Teilaspekte untergliedert werden. Den Aspekten bzw. Teilaspekten werden je nach dadurch beschriebener Eigenschaft ein oder mehrere Merkmale zugeordnet. Bei dem Aspekt *durchführbare Aufgaben* (siehe Kapitel 3.2.2) können einer Technik z.B. mehrere Merkmale bzw. Aufgabentypen zugeordnet werden. Der Aspekt *Metapher* (siehe Kapitel 3.2.1) ermöglicht dagegen nur die Zuordnung von einem Merkmal. Wie eingangs erwähnt, ermöglicht eine derartige Taxonomie die Klassifikation von Techniken hinsichtlich der einzelnen Merkmale. Dafür kann eine Teilmenge der Dimensionen bzw. Unterdimensionen verwendet werden oder alle; dann befindet sich aber in den meisten Klassen nur eine Technik.

Ausgangspunkt bei der Erstellung der Taxonomien (siehe Abbildung 3.2) waren bestehende Taxonomien und Klassifikationen von Interaktionstechniken, die bereits in Kapitel 2.4.1 beschrieben wurden. Diese wurden auf Basis einer traditionellen Literaturrecherche (Li & Wang, 2018) gefunden. Hierfür wurden die Suchplattformen Google Scholar¹ und Web of Science² verwendet. Die in der gefundenen Literatur angegebenen Referenzen wurden ebenfalls auf Relevanz überprüft. Die resultierende Auswahl an Arbeiten wurde genutzt, um die initialen Dimensionen der Taxonomie zu erstellen.

Die bis dahin gefundene Literatur führte bereits zu einer Vielzahl von Interaktionstechniken, die zusammengetragen wurden. Des Weiteren wurde eine systematische Literaturrecherche zu Studien durchgeführt, in denen Interaktionstechniken miteinander verglichen werden, die zu weiteren Techniken geführt hat. Für eine detaillierte Beschreibung dieser

¹<https://scholar.google.de>, letzter Abruf 21.02.2021

²<https://webofknowledge.com>, letzter Abruf 21.02.2021

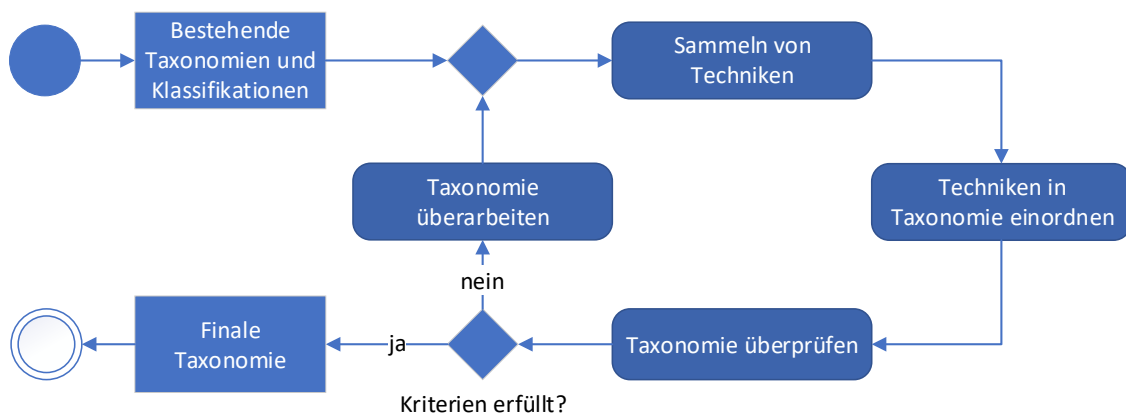


Abbildung 3.2: Vorgehen bei der Erstellung der Taxonomie.

Literaturanalyse wird auf Weise und Zender (2019) verwiesen. Die gefundenen Interaktionstechniken wurden in die Taxonomie eingeordnet (Bowman, 2002).

Anschließend wurde die Güte der Taxonomie nach der Einsortierung analysiert. Insbesondere standen dabei folgende zwei Kriterien im Vordergrund:

1. Generalität (Bowman & Hodges, 1999)
2. Granularität

Für Ersteres muss sichergestellt werden, dass jede Technik in die Taxonomie einsortierbar ist. Das heißt, wenn es für einen Aspekt bzw. Teilaspekt keine passende Charakteristik für eine Interaktionstechnik gibt, deutete dies auf eine nötige Erweiterung der Taxonomie hin. Die Granularität sollte dahingehend optimiert werden, dass die Techniken möglichst eindeutig anhand der Taxonomie klassifiziert werden können. D.h. es sollten ausreichend Dimensionen bzw. Unterdimensionen zur Verfügung stehen, sodass sich verschiedene Techniken in mindestens einem Merkmal unterscheiden. Die Optimierung der Granularität schließt allerdings auch mit ein, dass die Komplexität der Taxonomie in einem angemessenen Rahmen bleibt, weshalb letztendlich keine eindeutige Klassifizierung aller Techniken möglich ist (siehe Kapitel 3.3.1).

Auf Basis der Ergebnisse wurden die Dimensionen bzw. Unterdimensionen durch weitere mögliche Merkmale und komplette Dimensionen erweitert. Im Verlauf dieses Forschungsvorhabens wurden durch weitere Recherchen iterativ neue Interaktionstechniken gefunden, die diesen Prozess entsprechend weiterführten. Aufgrund dieses iterativen Vorgehens wurden im Laufe der Zeit verschiedene Versionen der Taxonomie veröffentlicht (Weise et al., 2019; Weise, Zender & Lucke, 2020). Letztendlich wurden 114 Interaktionstechniken identifiziert und eine Taxonomie mit 12 Dimensionen erstellt. Es kann davon ausgegangen werden, dass bei der Recherche nicht jede existierende Interaktionstechnik gefunden wurde. Dennoch wird vermutet, dass die 114 gefundenen Interaktionstechniken ein breites Spektrum an oft und auch selten genutzten Interaktionsformen abdecken und damit ein solides Fundament für die erstellte Taxonomie bilden.

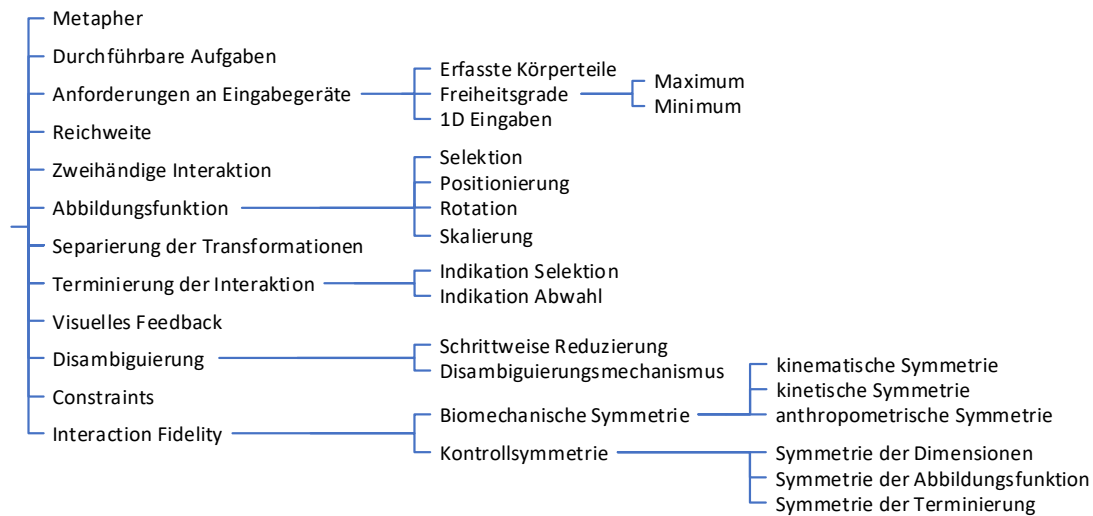


Abbildung 3.3: Dimensionen und Unterdimensionen der Taxonomie.

3.2 Dimensionen der Taxonomie

Im Folgenden sollen die Dimensionen der erstellten Taxonomie im Detail erläutert werden. Die Beschreibungen sind an die bereits veröffentlichten Arbeiten angelehnt (Weise et al., 2019; Weise, Zender & Lucke, 2020). Die ursprünglich englischen Dimensionen, Teildimensionen und Merkmale wurden für diese Arbeit soweit möglich ins Deutsche übersetzt. Abbildung 3.3 stellt alle Dimensionen und Unterdimensionen der Taxonomie dar. Eine vollständige Abbildung der Taxonomie mit allen Merkmalen ist im Anhang A.1 zu finden. Einige Interaktionstechniken wurden auf Basis der Taxonomie analysiert und sind in Tabelle 3.1 aufgelistet. Die Techniken wurden so ausgewählt, dass die möglichen Merkmale weitestgehend abgedeckt werden. Nicht alle Techniken, die in diesem Kapitel erwähnt werden, konnten in dieser Tabelle aufgenommen werden. Für eine vollständige Übersicht aller 114 Interaktionstechniken und ihrer Merkmale, wird auf die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Webanwendung verwiesen, die in Kapitel 5.1 vorgestellt wird.

3.2.1 Metapher

Im Allgemeinen basieren Interaktionstechniken auf Metaphern, die aus Interaktionen mit Objekten in der realen Welt bekannt sind. Metaphern helfen den Nutzenden beim Erlernen von Interaktionstechniken, da deren Funktionsweise auf bekannte Mechanismen, Werkzeuge oder Prinzipien zurückgeführt werden kann (Hinckley et al., 1994; Kulik, 2009). Die Dimension wurde in die Taxonomie aufgenommen, da sich hierüber ein Bild über die grundlegende Funktionsweise der Technik gemacht werden kann. Die Charakterisierung der Techniken hinsichtlich der verwendeten Metapher erfolgt anhand einer reduzierten Version der bereits in Kapitel 2.4.1 angesprochenen Einteilung von LaViola et al. (2017) (siehe Abbildung 3.4). Auf der ersten Ebene wird zwischen den Metaphern *Greifen*, *Zeigen* und *Hybrid* unterschieden. LaViola et al. (2017) unterteilen Techniken darüber hinaus anhand der Nutzung von Oberflächen, der Verwendung von einer Hand bzw. zwei Hän-

Name	Metapher	Durchführbare Aufgaben	Anforderungen an Eingabegeräte			
			Erfasste Körperteile	Freiheitsgrade		1D Eingaben
				Minimum	Maximum	
6-DOF Hand	Greifen fingerbasiert	Selektion Positionierung Rotation Skalierung	erste Hand Finger zweite Hand Finger	$x, y, z, \psi, \phi, \theta$ $x, y, z, \psi, \phi, \theta$ x, y, z $x, y, z, \psi, \phi, \theta$	$x, y, z, \psi, \phi, \theta$ $x, y, z, \psi, \phi, \theta$ x, y, z $x, y, z, \psi, \phi, \theta$	Keine
Asymmetric Bimanual Gestural Interface	Greifen fingerbasiert	Selektion Positionierung Rotation Skalierung	erste Hand Finger zweite Hand Finger	$x, y, z, \psi, \phi, \theta$ $x, y, z, \psi, \phi, \theta$ $x, y, z, \psi, \phi, \theta$ $x, y, z, \psi, \phi, \theta$	$x, y, z, \psi, \phi, \theta$ $x, y, z, \psi, \phi, \theta$ $x, y, z, \psi, \phi, \theta$ $x, y, z, \psi, \phi, \theta$	Keine
Bimanual Fishing Reel + Scale	Zeigen vektorbasiert	Selektion Positionierung Rotation Skalierung	erste Hand zweite Hand	ψ, ϕ ψ, ϕ	x, y, z, ψ, ϕ x, y, z, ψ, ϕ	1 Button (Selektion) 2 Buttons (Distanz) 2 Buttons (Skalierung) 1 Button (Rotation)
Crank Handle	Greifen fingerbasiert	Positionierung Rotation	Hand Finger	x, y, z $x, y, z, \psi, \phi, \theta$	x, y, z $x, y, z, \psi, \phi, \theta$	Keine
Expand	Zeigen volumenbasiert	Selektion	Hand	ψ, ϕ	x, y, z, ψ, ϕ	1 Button (Selektion)
Flashlight	Zeigen volumenbasiert	Selektion	Hand	ψ, ϕ	x, y, z, ψ, ϕ	1 Button (Selektion)
Go-Go	Greifen handbasiert	Selektion Positionierung Rotation	Hand	$x, y, z, \psi, \phi, \theta$	$x, y, z, \psi, \phi, \theta$	1 Button (Selektion)
Head-based Selection	Zeigen vektorbasiert	Selektion	Kopf	ψ, ϕ	x, y, z, ψ, ϕ	Keine
IntenSelect	Zeigen volumenbasiert	Selektion	Hand	ψ, ϕ	x, y, z, ψ, ϕ	1 Button (Selektion)
Push	Greifen handbasiert	Selektion Positionierung Rotation	Hand Unterarm Oberarm	x, y, z, ψ, ϕ x, y, z x, y, z	x, y, z, ψ, ϕ x, y, z x, y, z	Keine
Ray-Casting	Zeigen vektorbasiert	Selektion	Hand	ψ, ϕ	x, y, z, ψ, ϕ	1 Button (Selektion)
Scaled HOMER	Hybrid	Selektion Positionierung Rotation	Hand	$x, y, z, \psi, \phi, \theta$	$x, y, z, \psi, \phi, \theta$	1 Button (Selektion)
Scaled Scrolling World in Miniature	Greifen handbasiert	Selektion Positionierung Rotation	erste Hand zweite Hand	$x, y, z, \psi, \phi, \theta$ $x, y, z, \psi, \phi, \theta$	$x, y, z, \psi, \phi, \theta$ $x, y, z, \psi, \phi, \theta$	1 Button (Selektion) 1 Scrollrad (Skalierung)
Simple Virtual Hand	Greifen handbasiert	Selektion Positionierung Rotation	Hand	$x, y, z, \psi, \phi, \theta$	$x, y, z, \psi, \phi, \theta$	1 Button (Selektion)
Spindle	Greifen handbasiert	Selektion Positionierung Rotation Skalierung	erste Hand zweite Hand	x, y, z x, y, z	x, y, z x, y, z	2 Buttons (Selektion)

Tabelle 3.1: Anwendung der Taxonomie auf ausgewählte Interaktionstechniken. x , y und z stehen für die Positionen auf den entsprechenden Achsen in einem 3D-Koordinatensystem, und ψ , ϕ und θ stehen für die Rotation um diese Achsen. Die Freiheitsgrade sind dem erfassten Körperteil in der gleichen Zeile zugeordnet.

Name	Reichweite	Zweihändige Interaktion	Abbildungsfunktion				Separierung der Transformationen
			Selektion	Positionierung	Rotation	Skalierung	
6-DOF Hand	Armlänge	asymmetrisch-synchron	isomorph	isomorph	isomorph	distanzbasiert	$\{P,R\}, \{P,R,S\}$
Asymmetric Bimanual Gestural Interface	unendlich	asymmetrisch-asynchron	isomorph	neu zugeordnet	neu zugeordnet, isomorph	distanzbasiert	$\{P,R\}, \{R\}, \{S\}$
Bimanual Fishing Reel + Scale	unendlich	asymmetrisch-synchron	isomorph	neu zugeordnet	neu zugeordnet	neu zugeordnet	$\{P\}, \{P,S\}, \{P,R\}, \{P,S,R\}$
Crank Handle	unendlich	einhandig	Keine	Isomorph	neu zugeordnet	Keine	$\{P\}, \{R_x\}, \{R_y\}, \{R_z\}$
Expand	unendlich	einhandig	isomorph	Keine	Keine	Keine	-
Flashlight	unendlich	einhandig	isomorph	Keine	Keine	Keine	-
Go-Go	skaliert	einhandig	bereichsorientiert	bereichsorientiert	isomorph	Keine	$\{P,R\}$
Head-based Selection	unendlich	Keine	isomorph	Keine	Keine	Keine	-
IntenSelect	unendlich	einhandig	isomorph	Keine	Keine	Keine	-
Push	Armlänge	einhandig	isomorph	isomorph	isomorph	Keine	$\{P,R\}$
Ray-Casting	unendlich	einhandig	isomorph	Keine	Keine	Keine	-
Scaled HOMER	unendlich	einhandig	isomorph	zielorientiert, geschwindigkeitsorientiert	isomorph	Keine	$\{P,R\}$
Scaled Scrolling World in Miniature	unendlich	asymmetrisch-synchron	neu zugeordnet	neu zugeordnet	neu zugeordnet	Keine	$\{P,R\}$
Simple Virtual Hand	Armlänge	einhandig	isomorph	isomorph	isomorph	Keine	$\{P,R\}$
Spindle	Armlänge	symmetrisch-synchron	isomorph	isomorph	neu zugeordnet	distanzorientiert	$\{P,R_y,z,S\}$

Tabelle 3.1: Anwendung der Taxonomie auf ausgewählte Interaktionstechniken (fortgesetzt). P , R und S stehen für die Aufgaben Positionierung, Rotation und Skalierung, und R_x , R_y und R_z stehen für die Rotation um die x-, y- oder z-Achse eines 3D-Koordinatensystem. Transformationen, die durch geschweifte Klammern zusammengefasst sind, können gleichzeitig ausgeführt werden.

Name	Terminierung der Interaktion		Visuelles Feedback	Disambiguierung		Constraints
	Indikation Selektion	Indikation Abwahl		Schrittweise Reduzierung	Disambiguierungsmechanismus	
6-DOF Hand	Geste	Geste	3D-Cursor (virtuelle Hände), Zielhervorhebung (Volumen)	Keine	Keine	Keine
Asymmetric Bimanual Gestural Interface	Geste	Geste	3D-Cursor (virtuelle Hände), Zielhervorhebung (Farbe)	Keine	Keine	Keine
Bimanual Fishing Reel + Scale	Button drücken	Button drücken	3D-Cursor (virtueller Lichtstrahl), Zielhervorhebung (Volumen)	Keine	Keine	Keine
Crank Handle	Geste	Geste	3D-Cursor (Punkt), Widget (Stange am Objekt, die Modus anzeigt)	Keine	Keine	Reduktion der Freiheitsgrade
Expand	Button drücken	Keine	3D-Cursor (Kegel), Widget (3D Raster)	diskret/ mehrere Schritte	manuell	Keine
Flashlight	Button drücken	Keine	3D-Cursor (Kegel)	diskret/ einzelner Schritt	heuristisch	Einrasten am Objekt
Go-Go	Button drücken	Button loslassen	3D-Cursor (virtuelle Hand)	Keine	Keine	Keine
Head-based Selection	Verweilzeit	Keine	3D-Cursor (Punkt)	Keine	Keine	Keine
IntenSelect	Button drücken	Keine	3D-Cursor (virtueller Lichtstrahl), zusätzlicher Cursor (biegsamer Lichtstrahl), Adaptiver Cursor (biegsamer Lichtstrahl)	kontinuierlich	verhaltensbasiert	Einrasten am Objekt
Push	Geste	Geste	3D-Cursor (virtuelle Hand)	Keine	Keine	Keine
Ray-Casting	Button drücken	Keine	3D-Cursor (virtueller Lichtstrahl)	Keine	Keine	Keine
Scaled HOMER	Button drücken	Button loslassen	3D-Cursor (virtueller Lichtstrahl)	Keine	Keine	Keine
Scaled Scrolling World in Miniature	Button drücken	Button loslassen	3D-Cursor (Punkt), Widget (Pfeil der Scrollrichtung anzeigt)	Keine	Keine	Keine
Simple Virtual Hand	Button drücken	Button loslassen	3D-Cursor (virtuelle Hand)	Keine	Keine	Keine
Spindle	Button drücken	Button loslassen	3D-Cursor (Punkt)	Keine	Keine	Keine

Tabelle 3.1: Anwendung der Taxonomie auf ausgewählte Interaktionstechniken (fortgesetzt).

Name	Interaction Fidelity				
	Vergleichs- metapher	Biomechanische Symmetrie	Kontrollsymmetrie		
			Dimensionen	Abbildungsfunktion	Terminierung
6-DOF Hand	Objekt mit zwei Händen greifen und manipulieren	Arme, Hände und Finger bewegen und drehen	$(x, y, z, \psi, \phi, \theta)$, $(x, y, z, \psi, \phi, \theta, S)$	1:1 Position-zu-Position, 1:1 Rotation-zu-Rotation, 1:1 Distanz-zu-Skalierung	Objekt loslassen
Asymmetric Bimanual Gestural Interface	Auf ein Objekt zeigen und mit einer Hand manipulieren	Arme, Hände und Finger bewegen und drehen	$(x, y, z, \psi, \phi, \theta, S)$, $(\psi, \phi, \theta), (S)$	1:1 Position-zu-Position, 1:1 orientation-to-position-and- orientation, 1:1 Rotation-zu-Rotation, 1:1 Distanz-zu-Skalierung	Geste
Bimanual Fishing Reel + Scale	Auf ein Objekt zeigen und mit Stab manipulieren	Arm und Hand bewegen und drehen (keine Finger)	(x, y, z) , (x, y, z, S) , $(x, y, z, \psi, \phi, \theta, S)$	1:N Rotation-und-Position-und- 1D-Eingabe-zu-Position, 1:1 Rotation-zu-Rotation, 1:N 1D-Eingabe-zu-Skalierung	Button drücken
Crank Handle	Objekt mit einer Hand greifen und positionieren und drehen mit Kurbel	Arme, Hände und Finger bewegen und drehen	$(x, y, z), (\psi), (\phi)$, (θ)	1:1 Position-zu-Position, 1:1 Position-zu-Rotation	Geste
Expand	Auf ein Objekt zeigen	Arm und Hand bewegen und drehen (keine Finger)	(x, y, z, ψ, ϕ)	1:1 Position-zu-Position, 1:1 Rotation-zu-Rotation	Button drücken
Flashlight	Auf ein Objekt zeigen	Arm und Hand bewegen und drehen (keine Finger)	(x, y, z, ψ, ϕ)	1:1 Position-zu-Position, 1:1 Rotation-zu-Rotation	Button drücken
Go-Go	Objekt mit einer Hand greifen und manipulieren	Arm und Hand bewegen und drehen (keine Finger)	$(x, y, z, \psi, \phi, \theta)$	1:N Position-zu-Position, 1:1 Rotation-zu-Rotation	Button loslassen
Head-based Selection	Ein Objekt fokussieren	Nur den Kopf bewegen (keine Augen)	(x, y, z, ψ, ϕ)	1:1 Position-zu-Position, 1:1 Rotation-zu-Rotation	Dwell
IntenSelect	Auf ein Objekt zeigen	Arm und Hand bewegen und drehen (keine Finger)	(x, y, z, ψ, ϕ)	1:1 Position-zu-Position, 1:1 Rotation-zu-Rotation	Button drücken
Push	Objekt mit einer Hand greifen und manipulieren	Arm und Hand bewegen und drehen (keine Finger)	$(x, y, z, \psi, \phi, \theta)$	1:1 Position-zu-Position, 1:1 Rotation-zu-Rotation	Geste
Ray-Casting	Auf ein Objekt zeigen	Arm und Hand bewegen und drehen (keine Finger)	$(x, y, z, \psi, \phi, \theta)$	1:1 Position-zu-Position, 1:1 Rotation-zu-Rotation	Button drücken
Scaled HOMER	Auf ein Objekt zeigen und mit einer Hand manipulieren	Arm und Hand bewegen und drehen (keine Finger)	$(x, y, z, \psi, \phi, \theta)$	1:1 Position-zu-Position, 1:N Position-zu-Position, 1:1 Rotation-zu-Rotation	Button drücken
Scaled Scrolling World in Miniature	Objekt mit einer Hand greifen und manipulieren	Arm und Hand bewegen und drehen (keine Finger)	$(x, y, z, \psi, \phi, \theta)$	1:1 Stellvertreterposition-zu-Position, 1:1 Stellvertreterrotation-zu-Rotation	Button loslassen
Simple Virtual Hand	Objekt mit einer Hand greifen und manipulieren	Arm und Hand bewegen und drehen (keine Finger)	$(x, y, z, \psi, \phi, \theta)$	1:1 Position-zu-Position, 1:1 Rotation-zu-Rotation	Button loslassen
Spindle	Objekt mit zwei Händen greifen und manipulieren	Arm und Hand bewegen und drehen (keine Finger)	$(x, y, z, \phi, \theta, S)$	1:1 Position-zu-Position, 1:1 Position-zu-Rotation, 1:1 Distanz-zu-Skalierung	Button loslassen

Tabelle 3.1: Anwendung der Taxonomie auf ausgewählte Interaktionstechniken (fortgesetzt). x , y und z stehen für die Positionen auf den entsprechenden Achsen in einem 3D-Koordinatensystem, und ψ , ϕ und θ stehen für die Rotation um diese Achsen. Die Farben beschreiben die Natürlichkeit, wobei Dunkelgrün am natürlichsten ist.

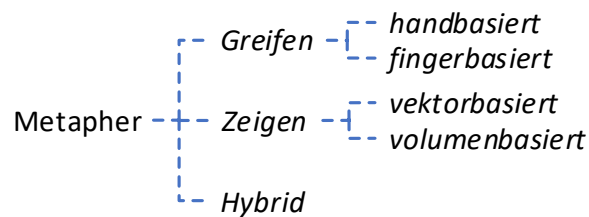


Abbildung 3.4: Mögliche Merkmale der Dimension *Metapher*.

den und der Indirektheit. Die Nutzung von Oberflächen wird in dieser Arbeit nicht als eigenständige Metapher aufgegriffen, da dies bei den gefundenen Interaktionstechniken immer auf eine der drei anderen Metaphern zurückgeführt werden kann. Die zweihändige Interaktion wurde als eigenständige Dimension aufgenommen (siehe Kapitel 3.2.5). Die Direktheit einer Technik war ursprünglich ebenfalls ein Teil der hier vorgestellten Taxonomie, wurde aber wieder entfernt, da diese sich mit anderen Dimensionen der Taxonomie überschneidet und eine objektive Einschätzung der Direktheit schwierig ist (siehe Kapitel 3.3.3).

Techniken, die die Metapher Greifen nutzen, basieren auf einem Interaktionsmuster, bei dem die Hand zu einem Objekt geführt wird, dieses aufgenommen und anschließend nach Bedarf manipuliert wird. Greifen wird weiterführend in *handbasiert* und *fingerbasiert* unterteilt (LaViola et al., 2017). Abbildung 3.5 visualisiert diese beiden Metaphern. *handbasierte* Techniken nutzen ausschließlich die Position und/oder Orientierung der Hand, um die Interaktion durchzuführen. *Simple Virtual Hand* (LaViola et al., 2017) ist eine der bekanntesten Vertreter dieser Kategorie. Hierbei wird die Position der echten Hand isomorph auf ein virtuelles Ebenbild übertragen. Wie bei *handbasierten* Techniken üblich, muss die Selektion eines Objekts durch das Betätigen eines Buttons oder der Verwendung eines ähnlichen Mechanismus ausgelöst werden. *fingerbasierte* Techniken ermöglichen hingegen die Interaktion mit den Fingern, wodurch z.B. auch entsprechende Gesten verwendet werden können, um ein Objekt zu greifen. Die verwendeten Eingabegeräte erfordern hierfür allerdings zusätzliche Tracking-Möglichkeiten. Eine naheliegende *fingerbasierte* Technik ist die Erweiterung von *Simple Virtual Hand* durch das Erfassen der Finger. Borst und Indugula (2005) haben hierfür z.B. ein Verfahren entwickelt, das die Bewegungen der echten Finger so auf die virtuellen Finger überträgt, dass virtuelle Objekte realistisch gegriffen werden können, ohne dass die virtuellen Finger die Objekte durchdringen. Ein weiterer Vertreter ist *Intent Driven Selection* (Periverzov & Ilies, 2015). Hier wird eine unsichtbare Kugel so generiert, dass die Finger die Oberfläche der Kugel berühren. Alle Objekte, die sich mit dieser Kugel überschneiden, sind Kandidaten für die Selektion. Das Schließen der Hand führt zu einer Verkleinerung der Kugel, bis letztendlich nur noch ein Objekt berührt und ausgewählt wird. Techniken, die die Greif-Metapher nutzen, sind meist anfälliger für die Ermüdung der beteiligten Körperteile, da diese hier oft viel bewegt werden (Argelaguet et al., 2008).

Die Metapher des Zeigens basiert auf dem Deuten auf Objekte von Interesse mit dem Finger oder mit Hilfsobjekten, wie einem Zeigestock oder einem Laserpointer. Eine Vielzahl von Selektionstechniken basiert auf diesem Interaktionsmuster, da hiermit auch Objekte

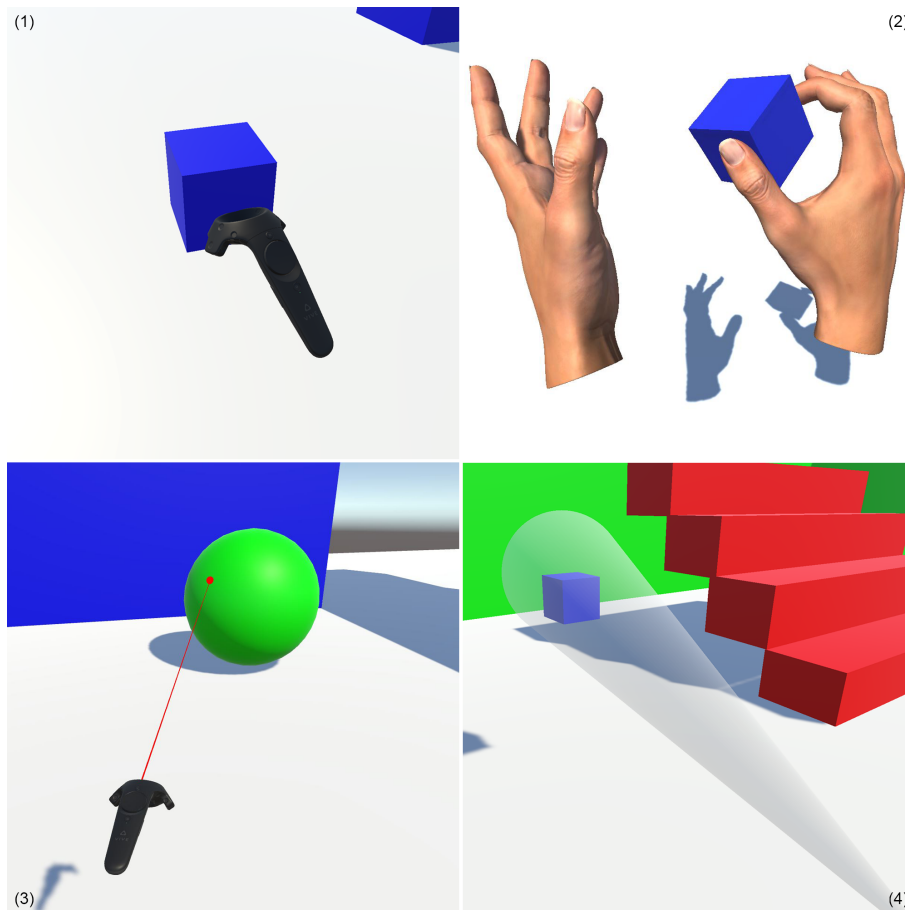


Abbildung 3.5: Beispiele für Techniken, die auf Metaphern aus der Realität basieren. (1) handbasierte Technik, bei der ein virtueller Controller an der Position der Hand angezeigt wird. (2) fingerbasierte Technik, bei der eine virtuelle Hand dargestellt wird, die sich wie die echte verhält. (3) vektorbasierte Technik, bei der ein Lichtstrahl als Cursor verwendet wird. (4) volumenbasierte Technik, bei der ein Kegel als Selektionsvolumen verwendet wird.

außerhalb der Reichweite der Nutzenden ausgewählt werden können. Die Metapher wird in *vektorbasiert* und *volumenbasiert* unterteilt (LaViola et al., 2017). In Abbildung 3.5 werden diese beiden Metaphern verbildlicht. Vektorbasierte Techniken verwenden einen sichtbaren oder auch unsichtbaren Lichtstrahl, um mit Objekten zu interagieren. *Ray-Casting* (Mine, 1995a) ist eine der meistgenutzten Techniken und verwendet einen Lichtstrahl, der von der Hand ausgeht, um das Zielobjekt zu markieren. Durch die Betätigung eines Buttons kann dieses anschließend ausgewählt werden. Oftmals wird *Ray-Casting* nur zu Selektion von Objekten verwendet, es besteht allerdings auch die Möglichkeit, das Objekt nach der Auswahl an den Lichtstrahl zu heften und somit eine anschließende Manipulation zu ermöglichen. Ohne zusätzliche Funktionalitäten ist eine Positionierung und Rotation so allerdings schwierig, da das Objekt nur auf einer kugelförmigen Bahn um den/der Nutzer/in herum bewegt werden kann. Bei der *Fishing Reel* Technik (Bowman & Hodges, 1997) wird das zusätzliche Verschieben auf dem Lichtstrahl durch zwei Buttons ermöglicht, die den Strahl verkürzen oder verlängern. Bei der *Head-based Selection* (Mine, 1995b) oder *Eye-based Selection* (Qian & Teather, 2017) wird ein unsichtbarer Lichtstrahl verwendet, um Objekte auszuwählen. In der Regel wird bei diesen Techniken ein Cursor (z.B. eine Kugel) dort eingblendet, wo sich die Gerade ausgehend vom Kopf oder von den

Augen mit einem Objekt schneidet. volumenbasierte Techniken nutzen entsprechend ein Volumen bei der Interaktion mit Objekten. *Flashlight* (Liang & Green, 1994) verwendet z.B. einen Kegel zur Selektion von Objekten. Da hier potenziell mehrere Objekte von dem Kegel eingeschlossen werden können, wird das Objekt ausgewählt, das zum Zeitpunkt der Selektion den geringsten Abstand zum Zentrum des Kegels aufweist. Dies ist bei vielen volumenbasierten Techniken zu beachten. Zwar wird aufgrund des Selektionsvolumens die Auswahl von kleinen Objekten vereinfacht, aber Szenarien mit einer hohen Objektdichte, wo potenziell viele Objekte in das Selektionsvolumen fallen, können für entsprechende Techniken problematisch sein (Vanacken et al., 2007). Aus diesem Grund ist bei derartigen Techniken immer ein Mechanismus nötig, der unter mehreren potenziellen Zielobjekten das richtige auswählt (siehe Kapitel 3.2.10).

Zeige-Techniken sind im Allgemeinen weniger physisch anspruchsvoll als Techniken, die auf der Metapher des Greifens basieren, da der Arm meist in einer angenehmen Position gehalten werden kann (Hincapié-Ramos et al., 2014). Das bereits in Kapitel 2.2.3 angesprochene Problem des perspektivischen Versatzes zwischen Hand und Auge betrifft dagegen vor allem Zeige-Techniken, und auch der natürliche Tremor kann aufgrund der größeren Distanz zum Selektionspunkt stärkere Auswirkungen haben (Bowman, 1999). Mehrere Studien (siehe z.B. Bowman et al. (1999)) haben gezeigt, dass sich Techniken, die auf der Metapher des Zeigens basieren, besser für die Selektion von Objekten auf größeren Distanzen eignen, während Techniken, die das Greifen nutzen, besser für die Manipulation von Objekten verwendbar sind. Hybride Techniken versuchen, die Stärken beider Interaktionsmuster zu verbinden. *HOMER* (Bowman & Hodges, 1997) nutzt z.B. *Ray-Casting* zur Selektion eines Objekts und eine Variante der *Simple Virtual Hand* zur Manipulation von Objekten. Die Bewegungen der realen Hand werden nicht isomorph auf die virtuelle Hand übertragen, sondern die Distanz zwischen dem Objekt und der/die Nutzer/in wird auf die Distanz zwischen der Hand und der/die Nutzer/in abgebildet, sodass das Objekt frei bis vor den eigenen Körper bewegt werden kann.

3.2.2 Durchführbare Aufgaben

Wie bereits in Kapitel 1.4 beschrieben, werden in dieser Arbeit die Aufgabentypen *Selektion*, *Positionierung*, *Rotation* und *Skalierung* betrachtet. Diese werden beim Aspekt *durchführbare Aufgaben* als mögliche Merkmale verwendet. Eine Technik kann dabei mehrere Aufgabentypen unterstützen. Die Selektion ermöglicht die Auswahl eines Objekts von Interesse, z.B. um dieses anschließend zu manipulieren. Bei der Positionierung und Rotation wird das Objekt verschoben und dessen Ausrichtung verändert. Die Skalierung ermöglicht das Vergrößern oder Verkleinern eines Objekts. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird die Manipulation eines Objekts auf einer oder mehreren Achsen auch als Transformation bezeichnet.

Da die Manipulation eines Objekts meist an die Selektion anschließt, ermöglichen die meisten Techniken die Selektion sowie eine oder mehrere Formen der Manipulation oder ausschließlich die Selektion. Die *Flashlight* Technik ermöglicht z.B. nur die Auswahl von Objekten. Die *Spindle* Technik (Mapes & Moshell, 1995) unterstützt hingegen alle vier Aufgabentypen. Bei dieser Technik sind beide Controller mit einer sichtbaren Linie verbunden, wobei sich in der Mitte eine Kugel befindet, die als Selektionspunkt fungiert.

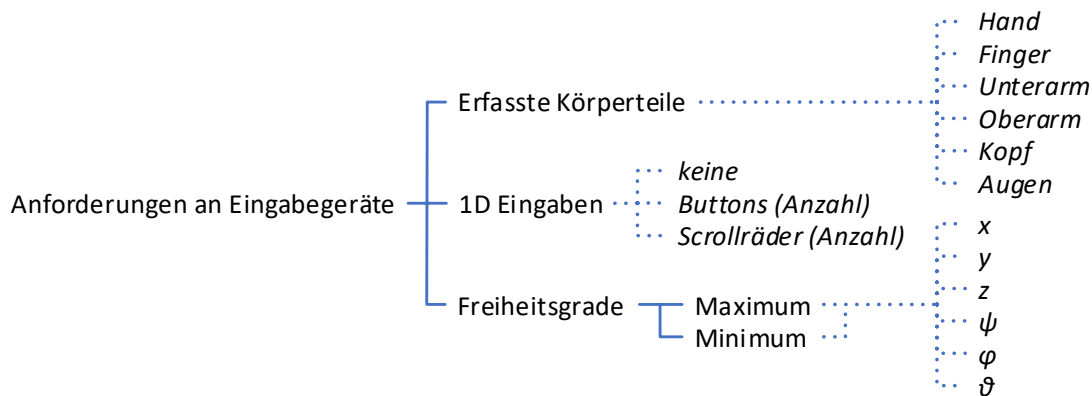


Abbildung 3.6: Mögliche Komponenten der Dimension *Anforderungen an Eingabegeräte*. Eine gepunktete Verbindung bedeutet, dass mehrere Merkmale zugewiesen werden können. Für die Teilaspekte *Freiheitsgrade Maximum* und *Freiheitsgrade Minimum* kann aus der selben Menge an Merkmalen gewählt werden.

Befindet sich dieser in einem Objekt, kann es ausgewählt werden. Das Objekt kann dann positioniert, rotiert oder skaliert werden, indem die Controller in die gleiche Richtung, in entgegengesetzte Richtungen oder auseinander bewegt werden. Das Unterstützen mehrerer Aufgaben erhöht entsprechend die Ausdrucksstärke einer Technik, kann aber auch zu einer höheren Komplexität und zu einer schlechteren Performance in den einzelnen Aufgaben führen (siehe Kapitel 2.2.4).

3.2.3 Anforderungen an Eingabegeräte

Eingabegeräte und Interaktionstechniken können grundsätzlich getrennt voneinander betrachtet werden. Eine Interaktionstechnik kann von mehreren Eingabegeräten verwendet werden und ein Eingabegerät kann mehrere Interaktionstechniken unterstützen (LaViola et al., 2017). Dennoch stellen Interaktionstechniken spezifische Anforderungen an die verwendeten Eingabegeräte. Entsprechend müssen Entwickelnde von VR-Anwendungen bei der Auswahl von passenden Techniken darauf achten, dass die verwendeten VR-Systeme diese auch unterstützen. Eingabegeräte können hinsichtlich vieler Faktoren klassifiziert werden (siehe z.B. Card et al. (1991); Mackinlay et al. (1990)). Buxton (1983) unterscheidet ursprünglich zwischen kontinuierlichen und diskreten Eingabegeräten und wie das Eingabegerät kontrolliert wird (z.B. Hand, Fuß oder Stimme). Darüber hinaus wird darin unterschieden, auf welche Art die Eingabe erfolgt (Position, Bewegung oder Druck) und in wie vielen Dimensionen diese erkannt werden (1, 2 oder 3). Anhand dieser Taxonomie wurden die drei Unterdimensionen *Erfasste Körperteile*, *Freiheitsgrade* und *1D Eingaben* definiert. Die Unterdimensionen und möglichen Merkmale sind in Abbildung 3.6 dargestellt.

Die untersuchten Interaktionstechniken greifen auf folgende Körperteile zurück: *Hand* (oder beide Hände), *Finger*, *Unterarm*, *Oberarm*, *Kopf* und *Augen*. Eine Vielzahl der Techniken benötigen nur eine Hand oder beide Hände. *Push* (Dam et al., 2013) ist ei-

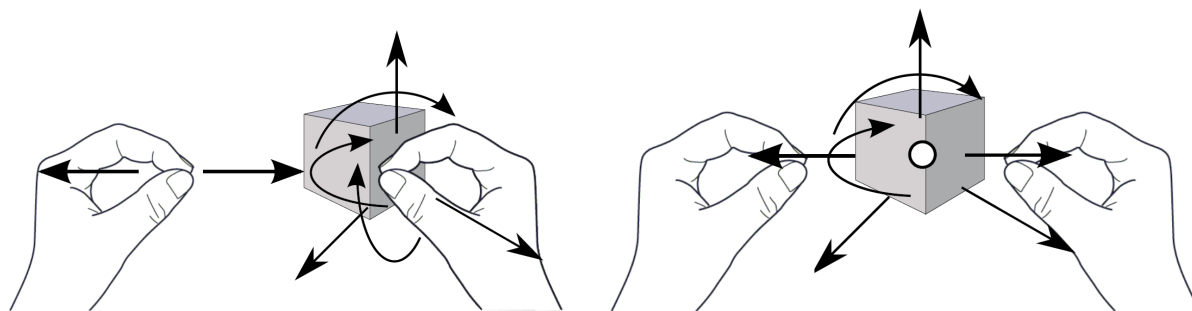


Abbildung 3.7: Schematische Darstellung der Techniken *6-DOF Hand* (links) und *Handle-Bar* (rechts) (Mendes et al., 2014).

ne der wenigen Techniken, die das Erfassen des Ober- und Unterarms voraussetzt, um durch eine Drück-Bewegung die Auswahl eines Objekts auszulösen. Von der Größe des verwendeten Körperteils kann abhängen, wie genau interagiert werden kann. Je kleiner das Körperteil, desto präzisere Bewegungen sind möglich (Accot & Zhai, 2001).

Für jedes erfasste Körperteil ermöglicht die Taxonomie die Angabe der Freiheitsgrade, die erkannt werden müssen, um die Interaktionstechnik zu unterstützen. Es gibt maximal sechs Freiheitsgrade, die sich aus der Position auf der x -, y - und z -Achse und der Rotation um diese drei Achsen zusammensetzen. In Tabelle 3.1 werden die Rotationen um die x -, y - und z -Achse mit ψ , ϕ und θ bezeichnet. Die Technik *6-DoF Hand* (Mendes et al., 2014) ermöglicht z.B. die Positionierung und Rotation eines Objekts mit der primären Hand und benötigt hierfür die Erfassung aller sechs Freiheitsgrade. Wird die zweite Hand hinzugenommen, kann das Objekt durch den Abstand zwischen beiden Händen skaliert werden. Hier reichen allerdings die drei Freiheitsgrade für die Position der sekundären Hand im Raum und die Orientierung muss nicht erfasst werden. Die Technik *Handle-Bar* (Song et al., 2012) funktioniert ähnlich wie *Spindle* und ermöglicht die Positionierung und Rotation eines Objekts, als wenn eine Stange gehalten wird, die durch das Objekt führt (siehe Abbildung 3.7). Durch das Auseinander- und Zusammenführen der Hände ist die Skalierung möglich. Eine Drehung um die Achse, die durch die Stange definiert ist, wird nicht ermöglicht. Somit ist bei dieser Technik für beide Hände nur die Erfassung der Position nötig. Die Funktionsweisen von *6-DoF Hand* und *Handle-Bar* sind schematisch in Abbildung 3.7 dargestellt. *Ray-Casting* benötigt in der einfachsten Form nur die Erfassung der Rotation um zwei Achsen, damit die Ausrichtung des Lichtstrahls ausreichend kontrolliert werden kann. Wird zusätzlich die Position im Raum erfasst, kann auch der Ausgangspunkt des Lichtstrahls kontrolliert und somit eine bessere Interaktion ermöglicht werden. Aus diesem Grund werden die Freiheitsgrade in der Taxonomie in *Minimal* und *Maximal* unterteilt, um die mindestens notwendigen und optimal erfassten Freiheitsgrade zu kennzeichnen.

1D Eingaben geben an, wie viele *Buttons* oder auch *Scrollräder* nötig sind, um die Interaktionstechnik zu nutzen. Viele Techniken wie *Flashlight* benötigen ausschließlich einen Button, um z.B. die Selektion auszulösen. *Bimanual Fishing Reel + Scale* aus der Anwendung *Engage*³ benötigt dagegen zusätzlich fünf weitere Buttons. Diese Technik nutzt einen Lichtstrahl, um ein Objekt zu selektieren, wobei das Objekt an den Lichtstrahl geheftet wird, sobald der entsprechende Button betätigt wurde. Anschließend kann das

³<https://engagevr.io>, letzter Abruf 21.02.2021

Eingabegerät	Erfasste Körperteile						Freiheitsgrade		1D Eingaben	
	Hand	Finger	Unterarm	Oberarm	Kopf	Augen	Position	Rotation	Buttons	Scrollräder
Leap Motion	x	x					x	x	0	0
HTC VIVE HMD					x		x	x	0	0
HTC VIVE Controller	x						x	x	5	1
Oculus Go Controller	x							x	4	1
Pupil Labs Eye Tracking						x		x	0	0
Microsoft Kinect v2	x		x	x	x		x	x	0	0

Tabelle 3.2: Eigenschaften von ausgewählten Eingabegeräten (angelehnt an Weise et al. (2019)).

Objekt auf dem Lichtstrahl durch zwei Buttons verschoben werden und zwei weitere Buttons ermöglichen die Skalierung des Objekts. Wird außerdem ein Button auf dem zweiten Controller betätigt, kann das Objekt durch die Drehung des Controllers rotiert werden. Die Technik wurde im Rahmen dieser Arbeit *Bimanual Fishing Reel + Scale* genannt, weil sie als eine Erweiterung der *Fishing Reel* Technik gesehen werden kann, die ebenfalls die Veränderung der Distanz zum Objekt durch zwei Buttons ermöglicht. Scrollräder sind bei gängigen 3D-Eingabegeräten kaum zu finden, können aber auch durch Touchpads abgedeckt werden. *Scaled Scrolling World in Miniature* (Wingrave et al., 2006) verwendet z.B. ein Miniaturmodell der tatsächlichen virtuellen Welt, in dem Stellvertreterobjekte manipuliert werden können, was sich wiederum auf die eigentlichen Objekte auswirkt. Über ein Scrollrad oder eine Alternative kann das Modell vergrößert oder verkleinert werden. Wie bereits in Kapitel 2.2.1 erläutert, kann die Verwendung von Buttons zum Heisenberg Effekt führen, bei dem sich der Selektionspunkt je nach dem verwendeten Selektionswerkzeug verschieben kann, wenn der Button gedrückt wird. Des Weiteren kann sich eine hohe Anzahl an Buttons negativ auf die Komplexität der Technik und die erfahrene kognitive Belastung auswirken (Bowman, 2002).

Buttons und Scrollräder können auch als diskrete und kontinuierliche Eingaben gesehen werden. Es wurde sich allerdings dagegen entschieden, diese Form der Einteilung zu verwenden, da kontinuierliche Eingaben mehr als nur Scrollräder einschließen. So ermöglicht z.B. auch der bei vielen Controllern verfügbare Trigger eine kontinuierliche Eingabe. Dieser kann ein Scrollrad aber in der Regel nicht ersetzen, da hiermit keine unbeschränkte Bewegung in einer Dimension möglich ist.

In Tabelle 3.2 sind die Eigenschaften von ausgewählten Eingabegeräten dargestellt. Hier ist zu erkennen, dass ein Oculus Go Controller nur die Orientierung der Hand erfassen kann, weshalb Interaktionstechniken, die auch die Position der Hand nutzen, mit diesem Controller nicht verwendet werden können. Die Kinect ist das einzige Eingabegerät in der Liste, das auch den Unter- und Oberarm und somit die *Push* Technik unterstützt. Einige Eingabegeräte, wie der Controller der HTC Vive, bieten effektiv eine höhere Anzahl Buttons an, indem z.B. das Touchpad durch das Drücken in verschiedenen Bereichen unterschieden werden kann. In Tabelle 3.2 wird dies nicht erfasst.

3.2.4 Reichweite

In der realen Welt können wir ohne Hilfsmittel oder Fortbewegung ausschließlich in dem Bereich arbeiten, den wir mit unseren Armen erreichen können. In der virtuellen Welt ist es möglich, diese Grenze zu überwinden. Die Dimension *Reichweite* ermöglicht eine initiale Einschätzung, ob eine Technik nur auf eine geringe Distanz spezialisiert ist oder die Interaktion auf größere Entfernungen unterstützt. Hierfür wird die Einteilung nach (Mendes et al., 2017) verwendet, in der in die Distanzen *Armlänge*, *skaliert* und *unendlich* unterteilt wird. Bei Techniken, die nur den Bereich unterstützen, der innerhalb einer Armlänge liegt, werden die realen Bewegungen in der Regel isomorph in die Virtualität übertragen. *Simple Virtual Hand* ermöglicht z.B. ausschließlich die Interaktion in diesem Bereich.

Techniken, die eine skalierte Entfernung unterstützen, können auch auf größere Distanz verwendet werden, ermöglichen aber keine unendliche Reichweite. *Go-Go* (Poupyrev et al., 1996) ist z.B. eine Erweiterung der *Simple Virtual Hand* Technik und verlängert den Arm, sobald dieser eine bestimmte Distanz vom Körper weggeführt wird. Die Technik ermöglicht somit eine natürliche Art der Interaktion im nahen Bereich, erlaubt aber auch, Objekte auf größere Distanz zu selektieren oder zu manipulieren. Die Reichweite ist allerdings beschränkt, da sie von der Armlänge der Nutzenden abhängt.

Techniken, die auf einer unendlichen Distanz genutzt werden können, haben dementsprechend keinerlei Grenzen, bis auf die bereits in Kapitel 2.2 genannten Beschränkungen durch die Nutzenden selbst oder des Systems. Meist verwenden diese Techniken einen Lichtstrahl wie *Ray-Casting*, der theoretisch eine uneingeschränkte Reichweite ermöglicht. Wird eine höhere Reichweite unterstützt, werden auch immer die darunterliegenden Distanzen unterstützt. Je höher die Reichweite einer Technik, desto anfälliger ist diese für Probleme, die zu einer geringeren Präzision führen, wie der Heisenberg Effekt oder eine skalierte Abbildungsfunktion (König et al., 2009), worauf bereits im Kapitel 3.2.6 eingegangen wurde.

3.2.5 Zweihändige Interaktion

Die Möglichkeit, zwei Hände zu verwenden, anstatt nur eine Hand zu benutzen, kann sich positiv auf die Interaktion auswirken, da die Nutzenden auf die Erfahrungen mit zweihändiger Interaktion aus dem Alltag zurückgreifen können (LaViola et al., 2017). Ulinski et al. (2009) unterteilt die Interaktion mit zwei Händen in *symmetrisch* oder *asymmetrisch* und *synchron* oder *asynchron*. Damit kann beschrieben werden, ob beide Hände die gleiche Bewegung oder unterschiedliche Aktionen durchführen und ob dies gleichzeitig oder nacheinander erfolgt. Die *Spindle* Technik ist z.B. symmetrisch-synchron, da beide Hände zur gleichen Zeit die gleichen Bewegungen durchführen. Lévesque et al. (2013) haben die asymmetrisch-asynchrone Interaktionstechnik *Asymmetric Bimanual Gestural Interface* entwickelt (siehe Abbildung 3.8). Dabei legt die nicht dominante Hand zuerst den Manipulationstypen (Positionierung, Rotation oder Skalierung) in Form einer Geste fest und die dominante Hand führt anschließend die entsprechende Aktion durch. Die Aktionen der Hände sind somit unterschiedlich und erfolgen nacheinander. Bei einigen Techniken

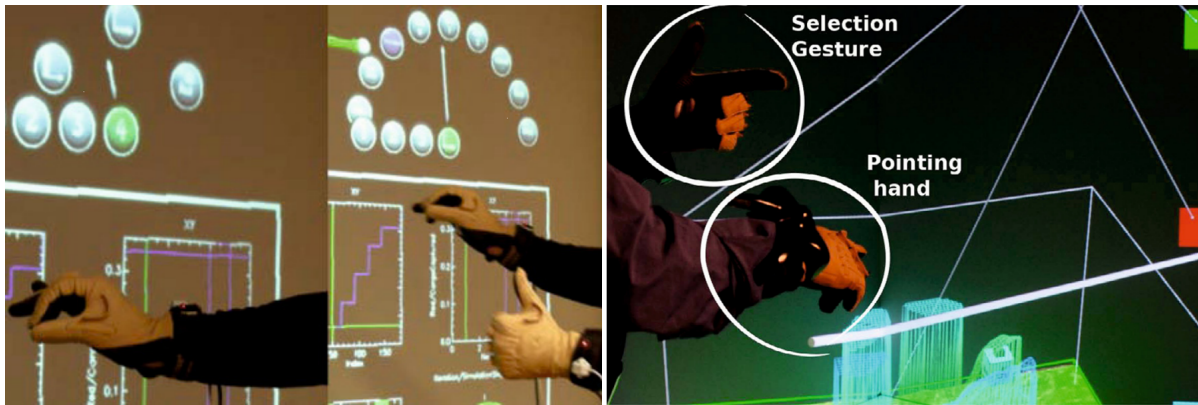


Abbildung 3.8: Asymmetric Bimanual Gestural Interface: die linke Hand legt den Modus fest und die rechte Hand führt die dazugehörige Aktion aus (Lévesque et al., 2013).

werden keine Hände verwendet, wie beispielsweise *Head-based Selection*, wo Objekte auf Basis der Ausrichtung des Kopfes selektiert werden.

Eine zweihändige Interaktion kann insbesondere dann zu besseren Resultaten führen, wenn die Aufgabe kognitiv anspruchsvoll ist und sowohl kognitiv als auch visuell als eine Aufgabe aufgefasst werden kann (Owen et al., 2005). In einer Studie von Bossavit et al. (2014) war die zweihändige Interaktion weniger ermüdend als die Verwendung einer Hand, obwohl beide Hände bewegt werden mussten. Dies führen die Autoren darauf zurück, dass die ungenutzte und ruhende Hand bei der Interaktion mit nur einer Hand als Vergleich herangezogen wurde. Sie fanden außerdem heraus, dass die Aufgaben mit zwei Händen zwar langsamer, aber dafür präziser durchgeführt werden konnten. Nach Kabbash et al. (1994) kann die zweihändige Interaktion darüber hinaus die Anzahl der durchzuführenden Schritte verringern und die Performance verbessern, ohne zusätzlichen kognitiven Aufwand zu generieren.

3.2.6 Abbildungsfunktion

Eine wichtige Aufgabe von Interaktionstechniken ist die Abbildung der realen Bewegungen auf virtuelle Bewegungen. Die Möglichkeit, diese Abbildungsfunktion bewusst anzupassen, ist ein Vorteil gegenüber der Realität und kann sich positiv auf die Interaktion mit virtuellen Objekten auswirken. In Abbildung 3.9 sind die möglichen Merkmale für den Aspekt Abbildungsfunktion dargestellt. Angelehnt an die Kategorisierung nach Mendes et al. (2019) werden Abbildungsfunktionen in der hier vorgestellten Taxonomie für die Selektion, Positionierung und Rotation in *isomorph*, *skaliert* und *neu zugeordnet* unterteilt. Bei der Selektion bezieht sich die Abbildungsfunktion auf die Manipulation des Selektionswerkzeuges. Die Abbildungsfunktion der Skalierung kann *distanzorientiert* und *neu zugeordnet* sein. Wird ein Aufgabentyp nicht von einer Technik unterstützt, existiert entsprechend auch keine Abbildungsfunktion. Mendes et al. (2019) definieren die Kategorie Hybrid, die in der hier vorgestellten Taxonomie durch die Möglichkeit der mehrfachen Zuweisung eines Abbildungstyps umgesetzt wird. Eine *isomorphe* Abbildungsfunktion überträgt die realen Bewegungen 1 zu 1 in die virtuelle Welt. Die *Virtual Hand* nutzt z.B. in den drei unterstützten Aufgabentypen Selektion, Positionierung und Rotation ei-

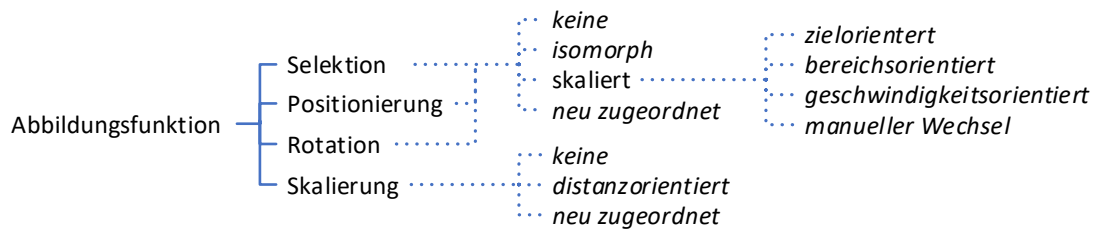


Abbildung 3.9: Mögliche Komponenten der Dimension *Abbildungsfunktion*.

ne isomorphe Abbildungsfunktion, wodurch eine sehr direkte und natürliche Form der Interaktion ermöglicht wird, aber größere Distanzen nicht überbrückt werden können.

Bei einer *skalierten* Abbildungsfunktion spielt die Control-Display Ratio (CD-Ratio) eine tragende Rolle. Diese beschreibt das Verhältnis zwischen der in Realität zurückgelegten Distanz (z.B. der Hand) und der vom virtuellen Gegenstück zurückgelegten Entfernung (z.B. des virtuellen Cursors). Eine Verringerung der CD-Ratio bedeutet somit, dass die virtuellen Bewegungen beschleunigt werden. Angelehnt an König et al. (2009) kann bei der *skalierten* Abbildung die CD-Ratio unter Berücksichtigung des *Ziels* oder der *Geschwindigkeit* oder durch einen *manuellen Wechsel* angepasst werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird diese Einteilung durch die *bereichsorientierte* Skalierung erweitert.

Wird die Abbildungsfunktion auf Basis eines *Ziels* skaliert, führt dies dazu, dass sich die CD-Ratio anhand der Distanz zu diesem Ziel verändert. Bei der Technik *Follow-Me* (Ouramdane et al., 2006) wird der Cursor z.B. ab einer bestimmten Distanz zu einem Objekt erst verlangsamt und bei einer weiteren Reduzierung der Distanz zum Objekt gezogen. Zielorientierte Techniken können insbesondere die Selektion von einzelnen Objekten unterstützen, erfordern aber semantisches Wissen über die Umgebung und können bei einer hohen Objektdichte Probleme bereiten (König et al., 2009). Eine Skalierung der Abbildungsfunktion anhand der *Geschwindigkeit* wird genutzt, um langsame Bewegungen weiter zu verlangsamen und so eine präzisere Interaktion zu ermöglichen oder schnelle Bewegungen weiter zu beschleunigen, um so größere Distanzen überbrücken zu können. Aufbauend auf dem Optimized Initial Impulse Model (siehe Kapitel 2.1.5) könnte eine Technik die CD-Ratio in der ballistischen Phase verringern, um schnellere Bewegungen zu ermöglichen und die CD-Ratio bei den anschließenden Korrekturen erhöhen, um die Präzision zu steigern. *Scaled HOMER* (Wilkes & Bowman, 2008) ist eine Erweiterung von *HOMER* (Bowman & Hodges, 1997) und nutzt eine derartige Abbildungsfunktion. Diese ist beispielhaft in Abbildung 3.10 visualisiert. Die Distanz zwischen Nutzer/in und der virtuellen Hand (SD_{hand}) wird auf Basis des realen Abstands (D_{hand}) skaliert. Die aktuelle Geschwindigkeit der Hand (V_{hand}) wird durch eine Konstante (SC) geteilt, sodass der Skalierungsfaktor 1 ist, wenn die Geschwindigkeit der Hand gleich der Konstante ist. Der Skalierungsfaktor kann bis auf 1.2 steigen, sodass schnellere Bewegungen als in der Realität möglich sind. Unter einer festgelegten Geschwindigkeit wird keine Bewegung übertragen. Auch auf die Rotation von Objekten kann sich eine derartige skalierte Abbildungsfunktion positiv auswirken (Poupyrev et al., 2000). Im Allgemeinen ermöglichen Techniken mit einer reduzierten CD-Ratio eine höhere Präzision, was Problemen, wie dem natürlichen Tremor oder dem Heisenberg Effekt, entgegenwirken kann.

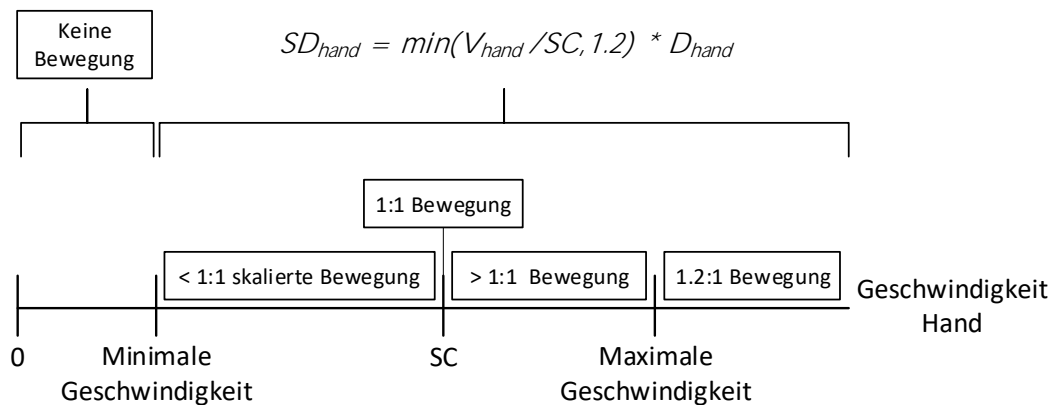


Abbildung 3.10: Abbildungsfunktion von *Scaled HOMER* (nach Wilkes und Bowman (2008)).

Bereichsorientierte Interaktionstechniken adaptieren die CD-Ratio anhand der Distanz zwischen Nutzer/in und Hand. Die *Go-Go* Technik z.B. teilt den Bereich um den/die Nutzer/in in zwei Bereiche ein. Im ersten Bereich (ungefähr $2/3$ der maximalen Armlänge) wird eine isomorphe Abbildungsfunktion genutzt. Im zweiten Bereich wird eine nicht-lineare Funktion verwendet, wodurch der Arm virtuell verlängert wird, um so auch Objekte zu erreichen, die sich sonst außerhalb der Reichweite befinden. Derartige Techniken mit einer CD-Ratio unter 1 sind im Allgemeinen unpräziser, weil kleine Bewegungen große Auswirkungen haben. Durch Verstärkung der Rotation kann aber so z.B. das Clutching (siehe Kapitel 2.2.3) reduziert werden (LaViola et al., 2017).

Der manuelle Wechsel ermöglicht es dem/der Nutzer/in aktiv zwischen verschiedenen Abbildungsfunktionen zu wählen. Diesen Ansatz verwendet z.B. die *ARM* Technik (Absolute and Relative Mapping) (Kopper et al., 2010). Dabei handelt es sich um eine *Ray-Casting* Technik, die es ermöglicht, durch das Betätigen eines Buttons in einen Präzisionsmodus zu wechseln, wo die CD-Ratio 10:1 beträgt. Dabei werden Rotationen mit dem Handgelenk verlangsamt, wodurch der Lichtstrahl präziser kontrolliert werden kann. Ein erneutes Drücken des Buttons wechselt wieder in den isomorphen Modus und löst den ggfs. entstandenen Unterschied zwischen Hand und Lichtstrahl wieder auf. Das manuelle Wechseln ermöglicht die Veränderung der Abbildungsfunktion, wenn es nötig ist, führt aber auch zu zusätzlichem Aufwand.

Techniken, die eine skalierte Abbildungsfunktion verwenden, müssen gut angepasst werden, da die Abweichung von realen Bewegungen schnell zu einem unnatürlichen und unvorhersehbaren Verhalten führen kann (König et al., 2009), was sich entsprechend auf die Nutzbarkeit der Technik auswirkt. Eine nicht isomorphe Abbildungsfunktion kann des Weiteren die kognitive Last erhöhen, da Nutzende die veränderten Bewegungen verstehen müssen (Osawa, 2006) und durch Unterschiede in der Position und/oder der Rotation der Hand und dem virtuellen Cursor irritiert werden könnten (König et al., 2009).

Die realen Bewegungen können auch neu zugeordnet werden. So können z.B. wie bei *Fishing Reel* Buttons verwendet werden, um die Position eines Objekts zu verändern. Bei *Crank Handle* (Bossavit et al., 2014) werden die Bewegungen für die Rotation eines

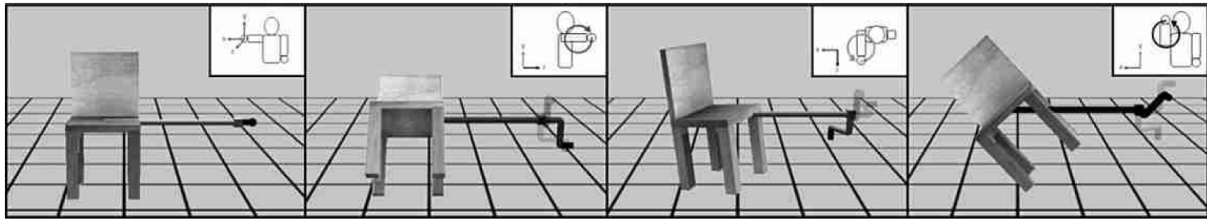


Abbildung 3.11: Manipulation eines Objekts mit der *Crank Handle* Technik (Bossavit et al., 2014). Positionsänderungen werden isomorph übertragen (Bild 1) und kreisende Bewegungen um eine Raumachse ermöglichen die Drehung des Objekts um diese Achse (Bilder 2-4).

Objekts neu zugeordnet. Die fingerbasierte Technik bietet zwei Modi an, zwischen denen durch eine Greifgeste gewechselt werden kann. Nach dem ersten Greifen mit der Hand werden die Positionsänderungen der Hand isomorph auf das Objekt übertragen, solange die Geste gehalten wird. In den Rotationsmodus wird gewechselt, wenn die Hand geöffnet und kurz darauf erneut geschlossen wird. Nun kann durch rotierende Bewegungen um die primären Achsen im Raum das Objekt separat um jede Achse gedreht werden (siehe Abbildung 3.11). Hier werden somit Positionsänderungen auf die Rotation eines Objekts abgebildet.

Auch bei der Skalierung kann eine Neuordnung durch Buttons verwendet werden. Viele Techniken skalieren Objekte aber auf Basis der Distanz zwischen beiden Händen. Bei *Spindle* führt das Auseinander- bzw. Zusammenführen beider Hände entsprechend zur Vergrößerung oder Verkleinerung des Objekts.

Einige Techniken nutzen mehrere Skalierungsfunktionen wie z.B. *Go-Go + PRISM* (Auteri et al., 2015). Hier wird die bereichsorientierte Abbildungsfunktion der *Go-Go* Technik benutzt, und durch die geschwindigkeitsorientierte Abbildungsfunktion von *PRISM* (Precise and Rapid Interaction through Scaled Manipulation) (Frees et al., 2007) werden langsamere Bewegungen verlangsamt, um auch auf größere Distanz präzisere Bewegungen zu ermöglichen.

3.2.7 Separierung der Transformationen

Viele der existierenden Techniken ermöglichen die gleichzeitige Durchführung mehrerer Manipulationsarten. Masliah und Milgram (2000) haben allerdings gezeigt, dass auch wenn dies von den Eingabegeräten und der verwendeten Interaktionstechnik ermöglicht wird, Nutzende oft dazu tendieren, die Positionierung und Rotation getrennt voneinander durchzuführen. Auch die Beschränkung der Manipulation auf weniger Achsen kann die Präzision erhöhen (Hinckley et al., 1994). Die Dimension *Separierung der Transformationen* ist angelehnt an die Unterteilung von Mendes et al. (2019) und beschreibt, ob eine Technik die separate Durchführung von Manipulationsaufgaben ermöglicht und auf welchen Achsen eine Manipulation gleichzeitig durchgeführt werden kann.

In Tabelle 3.1 sind einige Techniken aufgeführt, die eine getrennte Durchführung von Manipulationsaufgaben unterstützen. Dabei bezeichnen *P*, *R* und *S* die durchführbaren

Aufgaben und die Zusätze x , y und z auf welchen Achsen die entsprechende Transformation durchgeführt werden kann. Ist kein Zusatz angegeben, kann die Aufgabe nur auf allen Achsen gleichzeitig durchgeführt werden. Keine der gefundenen Interaktionstechniken unterstützt die Skalierung auf nur einer oder zwei Achsen. Die gleichzeitig durchführbaren Transformationen werden als Gruppe zusammengefasst. Die *Virtual Hand* Technik ermöglicht z.B. keinerlei Separierung der Transformationen ($\{P,R\}$). *Asymmetric Bimanual Gestural Interface* bietet dagegen drei Modi an, in denen entweder die Positionierung und Rotation gleichzeitig, die Rotation einzeln oder die Skalierung einzeln ermöglicht wird ($\{P,R\},\{R\},\{S\}$) und erlaubt somit eine teilweise Separierung. Die bereits erwähnte *Crank Handle* Technik ermöglicht eine vollständige separierte Manipulation von Objekten. Zum einen sind die Positionierung und Rotation voneinander getrennt und auch innerhalb der Rotation ist eine Separierung auf allen Achsen möglich ($\{P\},\{R_x\},\{R_y\},\{R_z\}$).

Bei Aufgaben, in denen nur eine Form der Transformation nötig ist, kann es die Aufgabe erleichtern, wenn die Technik die getrennte Durchführung der Transformationen ermöglicht (Hinckley et al., 1994). Ist z.B. nur die Positionierung eines Objekts nötig, aber die verwendete Technik erlaubt zusätzlich noch die Rotation und Skalierung, müssen sich die Nutzenden auch darauf konzentrieren, die Rotation und Skalierung beizubehalten, während die Position des Objekts verändert wird. Eine separate Durchführung einer Transformation verlangt allerdings oft den aktiven Wechsel verschiedener Modi, was die kognitive Belastung und den Zeitaufwand wiederum erhöhen kann (Mendes et al., 2019).

3.2.8 Terminierung der Interaktion

Eine Interaktionstechnik muss einen Mechanismus bieten, der die Selektion eines Objekts auslöst und wenn die Manipulation unterstützt wird, auch das Abwählen bzw. Loslassen des Objekts ermöglichen. Zum Auslösen einer Selektion unterscheidet Sanz (2011) zwischen folgenden Methoden: *Button drücken*, *Button loslassen*, *Verweilzeit* und *Geste*. Die untersuchten Techniken verwenden die gleichen Mechanismen für das Loslassen eines Objekts, weshalb diese Einteilung in dieser Taxonomie sowohl für das Selektieren als auch für die Abwahl eines Objekts genutzt wird.

Bei den meisten Techniken wird die Selektion eines Objekts durch die Betätigung eines Buttons ausgelöst. Die Auswahl eines Objekts beim Loslassen des Buttons kann dagegen weniger anfällig für den Heisenberg Effekt sein (Sanz, 2011). Die Abwahl eines Objekts wird in der Regel durch das Loslassen eines Buttons indiziert, welcher während der kompletten Manipulation des Objekts gedrückt gehalten wird. Nur wenige Techniken erfordern das erneute Drücken eines Buttons, wie z.B. die *Bimanual Fishing Reel + Scale* Technik, bei der Objekt nach der Selektion an den verwendeten Lichtstrahl geheftet wird.

Bei der Verwendung einer Verweilzeit muss der Cursor für eine vorgegebene Zeit auf dem Objekt platziert werden, um dieses auszuwählen. Hierbei kann der bereits angesprochene Midas Touch Effekt auftreten, wenn die Verweilzeit zu kurz gewählt wird (Argelaguet & Andujar, 2013). Auch die Selektion von kleinen Objekten kann durch diese Form der Indikation erschwert werden, weil der Cursor über längere Zeit in einem kleinen Bereich gehalten werden muss (Steed, 2006). Aus diesem Grund können sich auch Probleme, die wie z.B. der Hand Tremor zu einer Verschlechterung der Präzision führen, auf die Nutz-

barkeit derartiger Techniken auswirken. Der Heisenberg Effekt spielt bei der Verwendung einer Verweilzeit dafür keine Rolle.

Als Gesten für das Auswählen oder Loslassen von Objekten wird in der Regel das Öffnen oder Schließen der Hand verwendet, wofür auch die Finger erfasst werden müssen. Auch hier können Änderungen der Position oder Orientierung der Hand kurz vor der eigentlichen Durchführung der Interaktion Probleme bereiten (Caputo et al., 2017).

3.2.9 Visuelles Feedback

Feedback kann z.B. visuell, auditiv, haptisch, olfaktorisch oder gustatorisch erzeugt werden. Ausgabegeräte, die den Geruchs- oder Geschmackssinn ansprechen, befinden sich noch in den Anfängen der Entwicklung, weshalb diese Arten von Feedback hier nicht weiter betrachtet werden sollen. Haptisches Feedback kann zumindest rudimentär in Form von Vibrationen durch gängige VR-Controller erzeugt werden. Auch wenn auditives und haptisches Feedback die Interaktion unterstützen kann (Vanacken et al., 2006), werden diese bei den gesammelten Interaktionstechniken kaum beachtet oder benötigen spezielle Hardware (Mihelj & Podobnik, 2012). Aus diesen Gründen wird sich in dieser Arbeit nur mit visuellem Feedback auseinandergesetzt. Nach Analyse der gefundenen Interaktionstechniken wird hierfür in *3D-Cursor*, *Zielhervorhebung*, *Adaptiver Cursor*, *Zusätzlicher Cursor*, *Widgets* und *Stellvertreterobjekte* unterschieden. Eine Technik kann mehrere Formen des visuellen Feedbacks nutzen. Anhand der Beschreibungen der Techniken ist nicht immer zu erkennen, welche Technik welche Formen des Feedbacks unterstützt und es gibt selten ausführliches Bild- oder Videomaterial, um hier einen besseren Einblick zu erhalten. Es ist jedoch davon auszugehen, dass Techniken simple Formen des Feedbacks, wie die Hervorhebung des Zielobjekts, unterstützen, auch wenn dies nicht explizit in den Beschreibungen der Techniken erkennbar ist. In Tabelle 3.1 und in der interaktiven Taxonomie können nur Feedbackmechanismen angegeben werden, die in den Beschreibungen der Techniken erwähnt werden.

Nahezu jede Technik verwendet einen 3D-Cursor, der in folgenden Formen auftreten kann: virtuelle Darstellung der Hand oder des Controllers, Punkt-Cursor, Lichtstrahl oder Selektionsvolumen. *Head-based selection* verwendet z.B. einen Punkt Cursor, um die Blickrichtung zu visualisieren. *Flashlight* nutzt einen Kegel und entsprechend ein Selektionsvolumen als Cursor.

Die Zielhervorhebung wird bei Selektionstechniken meist genutzt, um das aktuell markierte Objekt hervorzuheben, welches nach Bestätigung der Selektion ausgewählt werden würde. Bei der Technik *Asymmetric Bimanual Gestural Interface* verändert das Zielobjekt z.B. seine Farbe. Das Objekt kann auch durch ein Volumen, wie z.B. ein Drahtgittermodell (Mendes et al., 2014), oder eine simple Kontur hervorgehoben werden. *Bubble Cursor* (Vanacken et al., 2007) verwendet hierfür eine transparente Kugel, die sich um das Objekt bildet (siehe Abbildung 3.12 (links)). *AutoWidth* (Liu & van Liere, 2009) vergrößert das Objekt, welches auf Basis der Bewegungen in der ballistischen Phase als Zielobjekt vorhergesagt wird. Bei Manipulationstechniken kann z.B. die vorhergesagte Zielposition hervorgehoben werden. Bei der *Knob* Technik (Caputo et al., 2017) wird eine schemen-

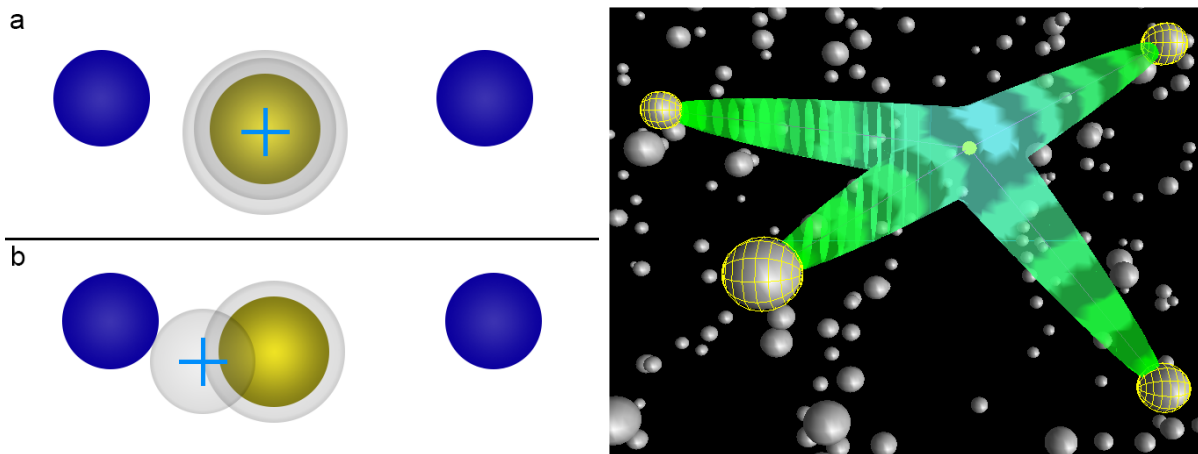


Abbildung 3.12: Veränderbare Cursor bei *Bubble Cursor* und *Starfish*. Links: Die transparente Kugel, die bei *Bubble Cursor* verwendet wird, umschließt das Objekt vollständig (a) und passt ihre Größe an, sodass immer nur ein Objekt überdeckt wird (b). Objekte werden durch eine umschließende transparente Kugel hervorgehoben (nach Vanacken et al. (2007)). Rechts: *Starfish* verwendet einen Cursor mit mehreren Armen, die sich mit nahen Objekten verbinden (Wonner et al., 2012).

hafte Darstellung des aktuell manipulierten Objekts bei langsameren Bewegungen dort angezeigt, wo die Manipulation vermutlich enden wird.

Cursor können sich während der Interaktion auch verändern, um eine Statusänderung zu kommunizieren. *Bubble Cursor* verwendet z.B. eine Kugel, deren Größe sich dynamisch anpasst, sodass maximal ein Objekt überdeckt wird und entsprechend bei der Selektion ausgewählt wird. *Starfish* (Wonner et al., 2012) verwendet einen Cursor mit mehreren Armen, die sich automatisch an in der Nähe befindliche Objekte heften. Nach der Betätigung eines Buttons wird der Cursor fixiert und ein weiterer Punkt-Cursor kann in den Armen bewegt werden, um ein Objekt auszuwählen. *Bubble Cursor* und *Starfish* sind in Abbildung 3.12 dargestellt. Auch die Veränderung der Farbe (Moore et al., 2018) oder eine Biegung des Cursors zum Zielobjekt (Riege et al., 2006) ist möglich. Meist wird die Veränderung eines Cursors genutzt, um ein Objekt zu markieren und kann somit ebenfalls als eine Form der Zielhervorhebung aufgefasst werden. In dieser Arbeit wird dennoch zwischen Zielhervorhebung und einem adaptiven Cursor unterschieden, wobei Ersteres von dem Zielobjekt und Letzteres von dem Selektionswerkzeug ausgeht.

Einige Techniken verwenden auch mehrere Cursor, wie z.B. bei *IntenSelect* (De Haan et al., 2005), wo neben einem normalen Lichtstrahl ein zusätzlicher gebogener Lichtstrahl angezeigt wird, der sich an das Objekt heftet, das vermutlich selektiert werden soll. Bei der *Virtual Hand* Technik von (Borst & Indugula, 2005) wird eine zusätzliche Hand eingeblendet, die Objekte nicht durchdringen kann, während die eigentliche Darstellung der Hand exakt den realen Bewegungen folgt.

Die Interaktion mit Widgets wurde zwar eingangs ausgeschlossen, aber diese können auch zum Anzeigen zusätzlicher Informationen genutzt werden. *Stretch Go-Go* (Bowman & Hodges, 1997) teilt den Bereich um den Nutzer in drei Bereiche. Befindet sich die Hand im mittleren Bereich, bleibt die Armlänge gleich. Wird die Hand im Bereich davor oder

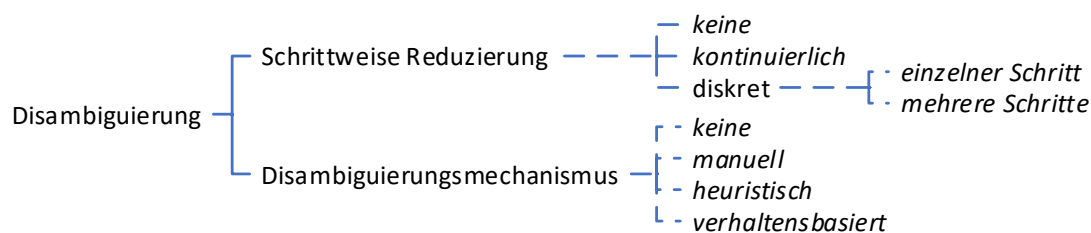


Abbildung 3.13: Mögliche Komponenten der Dimension *Disambiguierung*.

dahinter platziert, wird der Arm kontinuierlich verkürzt oder verlängert. Ein Widget visualisiert entsprechend, in welchem Bereich sich die Hand momentan befindet.

Stellvertreterobjekte sind in der Regel Kopien anderer virtueller Objekte, die für die indirekte Interaktion mit diesen genutzt werden können. *World In Miniature* nutzt z.B. Stellvertreterobjekte in einem Miniaturmodell, die dort im Aktionsradius der Nutzenden manipuliert werden können, obwohl die eigentlichen Objekte weiter entfernt sein können. *Voodoo Dolls* (Pierce et al., 1999) nutzt ein ähnliches Verfahren, bei dem Stellvertreter von Objekten mit beiden Händen erzeugt werden können. Die Position des Stellvertreters in der dominanten Hand relativ zum Stellvertreter in der nicht dominanten Hand wird dann auf das eigentliche Objekt übertragen.

Feedback ist unabdingbar, da Nutzende nur so Rückmeldung über den aktuellen Status der Anwendung und der Interaktionsmöglichkeiten erhalten (Wingrave et al., 2002). Zu viel Feedback kann sich allerdings insbesondere bei leichten Aufgaben negativ auswirken und die kognitive Belastung erhöhen, da zusätzliche Informationen verarbeitet werden müssen (Wingrave & Bowman, 2005). Auf größeren Distanzen kann visuelles Feedback dagegen bei der Selektion von Objekten unterstützen (Poupyrev & Ichikawa, 1999).

3.2.10 Disambiguierung

Wie bereits in Kapitel 2 angesprochen, kann die Selektion von kleinen Objekten Probleme bereiten. Die Verwendung von Selektionsvolumen kann dem entgegenwirken, da das Objekt hier nicht mehr exakt getroffen werden muss. Dies kann aber zur Folge haben, dass mehrere Objekte vom Selektionsvolumen eingeschlossen werden, insbesondere in Szenarien mit einer hohen Objektdichte (Vanacken et al., 2007). Aus diesem Grund muss die verwendete Interaktionstechnik eine Möglichkeit anbieten, eines dieser Objekte gezielt auswählen zu können. Das Vorgehen einer Technik hierbei, wird in dieser Taxonomie durch die Dimension *Disambiguierung* abgebildet. Dabei fließen die beiden Teilaspekte *schrittweise Reduzierung* (Mendes et al., 2017) und *Disambiguierungsmechanismus* (Argelaguet & Andujar, 2013) ein. Abbildung 3.13 stellt die beiden Teilaspekte und die Unterdimensionen dar.

Die schrittweise Reduzierung geht auf (Bacim et al., 2013) zurück und kann in zwei Phasen unterteilt werden (Mendes et al., 2017). In der ersten Phase wird ein Bereich definiert, der mehrere Objekte enthält (z.B. durch die Verwendung eines Selektionsvolumens). In

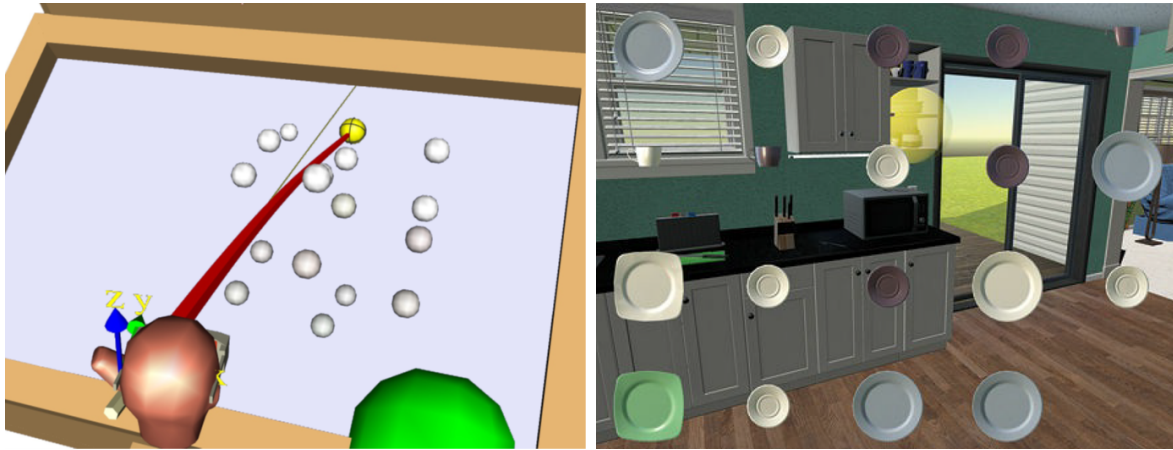


Abbildung 3.14: Beispiele für kontinuierliche und diskrete Reduzierung. *Links:* Bei *IntenSelect* heftet sich ein Lichtstrahl an das Objekt, welches auf Basis von kontinuierlichen Berechnungen als das Zielobjekt vorhergesagt wird (De Haan et al., 2005). *Rechts:* Bei *Expand* werden alle Objekte innerhalb des Selektionsvolumens in Form eines Rasters angeordnet, aus dem das Zielobjekt ausgewählt werden kann (LaViola et al., 2017).

der zweiten Phase wird der Disambiguierungsmechanismus angewendet, um die Anzahl der Objekte zu reduzieren, bis nur noch ein Objekt übrig ist. Diese Phase kann entweder *kontinuierlich* oder *diskret* sein. *Zoom* (Mendes et al., 2017) ist eine Ray-Casting Technik, die die kontinuierliche Reduzierung verwendet. Diese erlaubt die kontinuierliche Vergrößerung des Bereichs unter dem Cursor, bis das Zielobjekt gut auswählbar ist. *Zoom* wird auch in der *ARM* Technik (Kopper et al., 2010) verwendet. Zudem beruht die Vorhersage des Zielobjekts bei der Technik *IntenSelect* auf kontinuierlichen Berechnungen.

Die diskrete Reduzierung kann in einem *einzelnen Schritt* oder in *mehreren Schritten* durchgeführt werden. Bei der *Flashlight* Technik wird das Zielobjekt in einem einzelnen Schritt ausgewählt. Sobald die Selektion ausgelöst wird, wird das Objekt mit dem geringsten Abstand zum Zentrum des Kegels selektiert. Die Technik *Expand* (Cashion et al., 2012) benötigt dagegen mehrere Schritte. Hier werden alle Objekte, die in das Selektionsvolumen fallen, nach Betätigung eines Buttons in einem Raster angeordnet. Anschließend kann das Zielobjekt ausgewählt werden. *IntenSelect* und *Expand* sind in Abbildung 3.14 dargestellt.

Bacim et al. (2013) definieren außerdem die Reduzierungskriterien (z.B. durch die direkte Selektion der Objekte oder indirekt durch eine Liste), die Darstellung der selektierbaren Objekte (im Kontext oder außerhalb des ursprünglichen Kontextes) und die Strategie (Auswahl durch die Technik oder durch den/die Nutzer/in) als weitere Faktoren der schrittweisen Reduzierung. Es wurde sich dagegen entschieden, die ersten beiden Faktoren mit in die Taxonomie aufzunehmen, da die weitere Unterteilung der schrittweisen Reduzierung keinen Mehrwert bietet und die Komplexität der Taxonomie unnötig erhöhen würde. Die Strategie wird durch den Disambiguierungsmechanismus abgedeckt.

Der Disambiguierungsmechanismus kann entweder *manuell*, *heuristisch* oder *verhaltensbasiert* umgesetzt werden. Beim manuellen Ansatz wählt der/die Nutzer/in das Zielobjekt eigenständig aus. Dies ist z.B. bei *Expand* der Fall, wo das gewünschte Objekt in der zweiten Phase manuell im Raster ausgewählt wird. Heuristische Techniken bestimmen

das Zielobjekt anhand verschiedener Parameter. *Flashlight* nutzt z.B. den Abstand zum Zentrum des Kegels dafür. Verhaltensbasierte Techniken funktionieren ähnlich, beziehen aber auch das Verhalten der Nutzenden vor der Selektion mit ein. *IntenSelect* bestimmt das Zielobjekt z.B., indem die potenziellen Objekte bewertet werden. Dabei fließt wie bei *Flashlight* der Abstand zum Lichtstrahl mit ein, allerdings werden die Werte über die Zeit hin akkumuliert, wodurch auch zurückliegende Entfernungen einbezogen werden.

Die Verwendung von Disambiguierung kann in schwierigen Selektionsaufgaben unterstützen, in denen kleine, entfernte oder sich bewegende Objekten auftreten (De Haan et al., 2005; Mendes et al., 2019). Problemen, die sich auf die Präzision auswirken können, wie z.B. der natürliche Tremor oder der Heisenberg Effekt, kann durch die Verwendung von Disambiguierung entgegengewirkt werden (Moore et al., 2018). Die manuelle Disambiguierung in mehreren Schritten kann die Selektion von sehr kleinen Objekten beschleunigen und im Allgemeinen fehlerhafte Selektionen vermeiden (Kopper et al., 2011). Allerdings können manuelle Ansätze aufgrund der zusätzlich durchzuführenden Schritte den kognitiven Aufwand erhöhen (Sanz, 2011).

3.2.11 Constraints

Constraints sind Restriktionen, die die möglichen Handlungen bei der Interaktion mit virtuellen Objekten einschränken. Dadurch kann die Interaktion vereinfacht und eine höhere Präzision erreicht werden (Mine, 1995a). Constraints können direkt in die Anwendung implementiert werden und unabhängig von der verwendeten Interaktionstechnik sein. Beispielsweise emulieren physikalisch realistische Constraints (LaViola et al., 2017) Gegebenheiten aus der realen Welt wie Gravitation oder Kollisionen. Die Beziehung zwischen Objekten kann in Form von semantischen Einschränkungen einbezogen werden (Goesele & Stuerzlinger, 1999). So ist es z.B. möglich, einen Monitor nur auf einen Tisch zu platzieren oder einen Stuhl nur vor einen Tisch. Hierfür ist allerdings spezielles Wissen über die Objekte nötig. Bei der Analyse der gesammelten Techniken wurden die drei technikspezifischen Constraints *Reduktion der Freiheitsgrade*, *Einrasten an Position* und *Einrasten am Objekt* identifiziert.

Die Reduktion der Freiheitsgrade ermöglicht die Veränderung der Position oder Rotation auf eine oder zwei Achsen. Dies kann die Durchführung von präzisen Bewegungen unterstützen (LaViola et al., 2017). *Knob* (Caputo et al., 2017) erlaubt z.B. die Rotation um nur eine Achse, wobei diese anhand der Handbewegung hergeleitet wird. Darüber hinaus ermöglicht *Knob* das Einrasten des manipulierten Objekts an einer Position. Dabei wird das Objekt beim Loslassen zu einer etwas früheren Position gesetzt, um dem Heisenberg Effekt entgegenzuwirken. Das Einrasten am Objekt wird häufig in Selektionstechniken verwendet, um das Selektionswerkzeug mit dem z.B. durch Disambiguierung hergeleiteten Zielobjekt zu verbinden. Bei *IntenSelect* heftet sich der zweite Lichtstrahl z.B. an das Objekt mit der höchsten Bewertung. Constraints, die das Anheften an Objekte ermöglichen, können die Selektion in Umgebungen mit kleinen, entfernten, sich bewegenden oder sich überdeckenden Objekten, die auch in einer hohen Zahl auftreten können, unterstützen (De Haan et al., 2005).

3.2.12 Interaction Fidelity

Die Natürlichkeit spielt eine wichtige Rolle bei Interaktionstechniken und beschreibt, wie stark die Aktionen, die mit der Technik durchgeführt werden können, aus der Realität bekannten Handlungen entsprechen. Eine hohe Natürlichkeit kann die Performance einer Technik im Vergleich zu Techniken mit einer geringeren Natürlichkeit verbessern (siehe z.B. McMahan et al. (2006); Mine et al. (1997); Ware und Rose (1999)). McMahan et al. (2016) fanden durch den Vergleich mehrerer Studien außerdem heraus, dass ein moderates Level an Natürlichkeit zu einer schlechteren Performance führt als ein geringes Level an Natürlichkeit. Die Natürlichkeit einer Technik kann durch das Framework für Interaction Fidelity Analysis (FIFA) (McMahan, 2011) quantifiziert werden und wird in dieser Taxonomie als *Interaction Fidelity* abgebildet. Hierfür wird die Technik mit einer äquivalenten Interaktion aus der realen Welt verglichen. Dabei wird in den drei Kategorien biomechanische Symmetrie, Kontrollsymmetrie und Systemeignung unterschieden. Die biomechanische Symmetrie beschreibt, wie sehr sich die Bewegungen und die wirkenden Kräfte bei der Vergleichsinteraktion unterscheiden. Die Kontrollsymmetrie beschreibt, wie sehr sich die Steuerung der virtuellen und realen Interaktion ähnelt. Die Systemeignung stellt heraus, wie natürlich die Technik bei der Verwendung bestimmter Ein- und Ausgabegeräte wirkt. In dieser Arbeit werden die Techniken nicht spezifischen Ein- und Ausgabegeräten zugeordnet, weshalb in der Taxonomie nur die *biomechanische Symmetrie* und die *Kontrollsymmetrie* miteinbezogen werden.

Die biomechanische Symmetrie wird weiter unterteilt in *kinematische Symmetrie*, *kinetische Symmetrie* und *anthropometrische Symmetrie*. Die kinematische Symmetrie beschreibt die Körperteile, die bei der Durchführung der Interaktion verwendet werden. Die kinetische Symmetrie untersucht die Kräfte, die dabei auf den Körper wirken. Die anthropometrische Symmetrie beschreibt, wie exakt die durchgeführten Bewegungen der Bewegungen aus der Vergleichsinteraktion entsprechen. In Tabelle 3.1 werden die Teilaspekte der biomechanischen Symmetrie nicht explizit aufgeschlüsselt, da hier bei den aufgelisteten Techniken kaum Unterschiede erkennbar sind. Für einen tieferen Einblick wird auf die in Kapitel 5.1 vorgestellte Webanwendung verwiesen.

Bei der Kontrollsymmetrie wird die *Symmetrie der Dimensionen*, die *Symmetrie der Abbildungsfunktion* und die *Symmetrie der Terminierung* unterschieden. Die *Symmetrie der Dimensionen* beschreibt, ob die Achsen, auf denen die Interaktion durchgeführt wird der Vergleichsinteraktion entsprechen. Die *Symmetrie der Abbildungsfunktion* untersucht die Abbildung von Rotations- und Positionsänderungen. Die *Symmetrie der Terminierung* vergleicht den Abschluss der virtuellen und realen Interaktion.

Die Ähnlichkeit zur Vergleichsinteraktion aus der realen Welt kann für jeden der vorgestellten Teilaspekte auf einer Skala von 1 bis 5 (geringe bis hohe Natürlichkeit) bewertet werden. In Tabelle 3.1 wird diese Skala mit Farben von Dunkelrot bis Dunkelgrün abgebildet. Die *Virtual Hand* Technik hat eine hohe *Interaction Fidelity*. Als Vergleich wird das reale Greifen eines Objekts herangezogen. Bei der biomechanischen Symmetrie und der Terminierung erreicht die Technik einen Wert von 4, weil die Finger nicht erfasst werden, und somit auch das Objekt durch das Loslassen eines Buttons und nicht durch das tatsächliche Öffnen der Hand losgelassen wird. Die kontrollierbaren Dimensionen sind dagegen die gleichen wie bei der Vergleichsinteraktion und die Abbildungsfunktion ist

isomorph. Bei der Technik *Bimanual Fishing Reel + Scale* zeigt sich die teilweise schwierige Anwendung des Frameworks, auf die auch in Kapitel 3.3.2 näher eingegangen wird. Hier werden als Vergleichsinteraktion das Zeigen auf ein Objekt und die anschließende Manipulation des Objekts, als wäre dieses an einem Stab befestigt, herangezogen. Die Abbildungsfunktion erhält hier eine sehr geringe Bewertung, da sowohl die Bewegungen des Lichtstrahls als auch die Verwendung von Buttons die Position des Objekts verändern. Zusätzlich wird auch die Objektgröße durch Buttons beeinflusst. Durch die verschiedenen Modi und der Möglichkeit der Skalierung des Objekts, was so in der Vergleichsmetapher nicht möglich ist, erhält die Technik bei der Symmetrie der Dimensionen eine schlechtere Bewertung. Zudem ist das Drücken eines Buttons hier ungewöhnlich. Die biomechanische Symmetrie erhält dagegen eine relativ gute Bewertung, da bis auf die Finger die gleichen Körperteile beteiligt sind und auch ähnliche Kräfte wirken.

McMahan et al. (2016) haben bereits eine aktualisierte Version des FIFA veröffentlicht, in der zusätzlich die verschiedenen Phasen der Interaktion (Initiierungsphase, Fortführungsphase und Terminierungsphase) einbezogen werden. Die kinematische Symmetrie, die kinetische Symmetrie und die anthropometrische Symmetrie werden entsprechend hinsichtlich jeder einzelnen Phase untersucht. Es wurde sich gegen die Verwendung der aktualisierten Version entschieden, da keine relevanten Unterschiede für die gesammelten Techniken festgestellt werden konnten und die Analyse der Natürlichkeit einer Technik niederschwellig gehalten werden sollte. Die Teilaspekte der Interaction Fidelity überdecken sich teilweise mit anderen Dimensionen wie der Abbildungsfunktion, Separierung der Transformation oder der Terminierung der Interaktion. Dies ist nötig, damit die Interaction Fidelity als Ganzes betrachtet werden kann und nicht auf die anderen Dimensionen zurückgegriffen werden muss.

3.3 Diskussion

Mit Hilfe der Taxonomie können Entwickelnde initial einschätzen, ob eine Interaktionstechnik für ein bestimmtes Anwendungsszenario geeignet ist. Des Weiteren schlüsselt die Taxonomie die wichtigsten Eigenschaften von Interaktionstechniken auf und kann die Entwicklung neuer oder die Anpassungen existierender Techniken unterstützen, indem Eigenschaften gezielt adaptiert werden. So könnte z.B. eine Technik, die keine Disambiguierung verwendet, durch die Disambiguierung von *IntenSelect* erweitert werden. Im Folgenden sollen einige Details der Taxonomie diskutiert werden. Insbesondere soll auf die Validität der Taxonomie, die Nachteile von FIFA und auf ungenutzte Dimensionen eingegangen werden.

3.3.1 Validität der Taxonomie

Das Ziel bei der Erstellung der Taxonomie war es, eine Vielzahl von existierenden Interaktionstechniken eindeutig anhand ihrer Eigenschaften klassifizieren zu können, ohne die Dimensionen unnötig komplex zu gestalten. Letztendlich war es nicht möglich, alle Techniken eindeutig in die Taxonomie einzuordnen. Das bedeutet, dass es Techniken gibt, die die gleichen Merkmale aufweisen und sich in Details unterscheiden, die nicht

von der Taxonomie abgedeckt werden können. So basieren z.B. die Techniken *Adaptive Pointing* (König et al., 2009), *Smoothed Pointing* (Gallo & Minutolo, 2012) und *PRISM enhanced Ray-Casting* (Frees et al., 2007) auf der *Ray-Casting* Technik und verlangsamen den Lichtstrahl bei langsamen Bewegungen, um eine höhere Präzision zu erlauben. Nur die verwendeten Skalierungsfunktionen unterscheiden sich in einigen Implementierungsdetails. Auch die Techniken *Push* und *Hold* (Dam et al., 2013) unterscheiden sich nach der Taxonomie nicht. Hier wird das Objekt durch eine Geste selektiert. Bei *Hold* wird diese Geste bei der Manipulation gehalten und bei *Push* wird diese erneut durchgeführt, um das Objekt loszulassen. Um diese Techniken eindeutig klassifizierbar zu machen, hätten weitere Merkmale hinzugefügt werden müssen. Es wurde sich allerdings dagegen entschieden, weil dies die Komplexität der Taxonomie unnötig erhöht hätte und nur die angesprochenen Techniken von den neuen Merkmalen betroffen wären.

Ohnehin kann die Taxonomie nur eine Momentaufnahme der Eigenschaften aktueller Interaktionstechniken darstellen. Auch kann nicht garantiert werden, dass alle existierenden Techniken von der Taxonomie abgedeckt werden. Es wird aber vermutet, dass die 114 gefundenen Techniken eine solide Grundlage an gebräuchlichen und auch ungewöhnlichen Techniken darstellen, die auf Basis einer systematischen und iterativen Recherche (siehe Kapitel 3.1) gefunden wurden. Auch die Integration von existierenden Taxonomien und Klassifikationen trägt zur Validität der Taxonomie bei. Die Natur einer Taxonomie ermöglicht außerdem die einfache Erweiterung durch weitere Dimensionen und Merkmale. Sollte es die technische Weiterentwicklung in Zukunft beispielsweise ermöglichen, dass Interaktionstechniken verschiedene Arten von haptischem Feedback nutzen können, kann hierfür eine weitere Dimension zur Taxonomie hinzugefügt werden.

Der Taxonomie wurde des Weiteren in zwei wissenschaftlichen Arbeiten veröffentlicht, die einem Peer-Review unterzogen wurden (siehe Weise et al. (2019); Weise, Zender und Lucke (2020)). Die zweite Veröffentlichung (Weise, Zender & Lucke, 2020) enthielt dabei einige wenige Überarbeitungen der Taxonomie. In der hier vorgestellten Version der Taxonomie wurde im Vergleich zur letzten Veröffentlichung nur die Dimension Direktheit entfernt (siehe Kapitel 3.3.3).

3.3.2 Kritik an FIFA

Das von McMahan (2011) entwickelte Framework for Interaction Fidelity Analysis ist das einzige fundierte Werkzeug, um die Natürlichkeit einer Interaktionstechnik objektiv einschätzen zu können. Bei der Bewertung der Techniken auf Basis des Frameworks wurden allerdings einige Probleme festgestellt. Ob eine Technik natürlich ist, hängt nicht nur von den Eigenschaften der Technik ab, sondern auch von den Vorerfahrungen der Nutzenden. Das Framework überprüft, wie ähnlich die Durchführung einer Aufgabe mit einer Technik einer vergleichbaren Interaktion in der realen Welt ist. Diese Vergleichsinteraktion aus der Realität muss also identifiziert werden und es kann vorkommen, dass manche Nutzende eine Technik als unnatürlich empfinden, weil sie diese Interaktion nicht aus der realen Welt kennen, während andere Nutzende die Technik als sehr natürlich empfinden. So ist es z.B. schwierig, eine Vergleichsinteraktion für das Skalieren zu finden, wofür maximal das Auseinander- oder Zusammenschieben eines realen Objekts herangezogen werden kann.

McMahan (2011) stellt das Framework als ein objektives Instrument zur Bestimmung der Natürlichkeit einer Technik vor. Bei der Anwendung des Frameworks im Rahmen dieser Arbeit mussten allerdings einige Annahmen getroffen werden, die einen gewissen Grad an Subjektivität einführten. McMahan sagt, dass eine objektive Einschätzung durch Methoden aus der Biomechanik möglich ist und er bestimmt beispielhaft die Natürlichkeit einiger Interaktionstechniken. Anhand dieser Beispiele fällt es allerdings schwer abzuleiten, ab wann genau eine Technik in einer Kategorie eine geringere Natürlichkeit aufweist als eine andere. Wie stark wirkt sich bei einer Technik in der Kategorie anthropometrische Symmetrie beispielsweise die Verwendung von weniger Körperteilen im Vergleich zur realen Interaktion aus? Die Person, die das Framework anwendet, muss bei der *Head-based Selection* z.B. auch entscheiden, wie viel unnatürlicher es ist, ein Objekt mit dem Kopf zu fokussieren anstatt mit den Augen. In dieser Arbeit wurde zur Vereinfachung außerdem eine diskrete Skala mit fünf möglichen Werten angenommen, während in der Arbeit von McMahan eine kontinuierliche Skala verwendet wird, die bei der Anwendung allerdings auf diskrete Werte abgebildet wird. McMahan beschreibt selbst, dass es für einige Kategorien schwer ist, die Natürlichkeit einer Technik mit einer realen Interaktion analytisch zu vergleichen. Um z.B. das Schwingen eines Baseballschlägers mit der Kinect oder einem 3D Controller als Eingabegerät zu vergleichen, müsste entsprechend eine Studie durchgeführt werden, in der die Bewegungen aufgenommen und mit der Verwendung eines realen Baseballschlägers verglichen werden. Derartige Studien sind in Rahmen dieser Arbeit nicht leistbar, weshalb beim Anwenden des Frameworks entsprechende Annahmen getroffen werden mussten.

McMahan bestimmt in seiner Arbeit die Natürlichkeit von Interaktionstechniken bzgl. bestimmter Interaktionen, wie das bereits erwähnte Schlagen eines Balles mit einem Baseballschläger oder die Durchführung von Boxbewegungen. Analog müsste die Natürlichkeit der Techniken in dieser Arbeit einzeln hinsichtlich aller durch die jeweilige Technik unterstützter Aufgabentypen (Selektion, Positionierung, Rotation und Skalierung) betrachtet werden. In realen Szenarien ist diese Trennung allerdings schwer vorzunehmen und die Aufgabentypen gehen nahtlos ineinander über. Aus diesem Grund wurde die Natürlichkeit der Techniken in dieser Arbeit als Ganzes betrachtet. Dies erschwert entsprechend das Finden einer Vergleichsinteraktion, die alle Aufgabentypen unterstützt. Eine Ray-Casting Technik kann z.B. für die Selektion von Objekten noch natürlich wirken, während die Manipulation eines Objekts sich eher unnatürlich anfühlt. Auch die fehlende Unterstützung eines Aufgabentyps wirkt sich nicht auf die Bewertung aus, obwohl man das eventuell bei der Nutzung der Technik erwarten würde.

Das Framework wird mit der Kategorie Systemeignung auch das verwendete Eingabegerät bei der Bestimmung der Natürlichkeit einer Technik miteinbezogen. Dazu werden die Eigenschaften Genauigkeit, Präzision, Latenz und Formfaktor betrachtet. In dieser Arbeit werden zwar die Anforderungen von Techniken an die Eingabegeräte betrachtet, es wird aber davon ausgegangen, dass Techniken mit unterschiedlichen Eingabegeräten genutzt werden können. Aus diesem Grund konnte die Systemeignung hier nicht untersucht werden. Das verwendete Eingabegeräte kann sich somit ebenfalls auf die Natürlichkeit der Interaktion auswirken.

Auch zusätzliche Funktionen einer Technik, wie Disambiguierung oder spezifische Feedbackmechanismen, werden nicht von dem Framework beachtet. Ebenso sind Funktionen, die durch Buttons oder Scrollräder abgedeckt werden, wie das Vergrößern des Miniatur-

modells bei der *Scaled Scrolling World in Miniature* Technik (Wingrave et al., 2006), schwer durch das Framework einbeziehbar. Trotz dieser Probleme wurde sich dafür entschieden, die Kategorie in der Taxonomie zu behalten, weil das Framework zumindest eine grundlegende Einschätzung der Natürlichkeit ermöglicht und es im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich war, das Framework anzupassen. Weitere Forschungsarbeiten könnten hier aber anknüpfen.

3.3.3 Nicht genutzte Dimensionen

Wie bereits in Kapitel 3.1 angesprochen, ist die Taxonomie auf Basis eines iterativen Prozesses entstanden. Dies bedeutet, dass dabei Dimensionen in Erwägung gezogen wurden, die es letztendlich doch nicht in die finale Taxonomie geschafft haben. Auch wurden einige Eigenschaften von Techniken von vornherein ausgeschlossen, die in anderen Klassifikationen oder Taxonomien verwendet werden. Im Folgenden soll auf einige dieser Dimensionen und Eigenschaften eingegangen und begründet werden, warum diese nicht in die finale Taxonomie integriert wurden. Hierdurch sollen mögliche zukünftige Anpassungen der Taxonomie unterstützt werden, um unnötige Erweiterungen zu vermeiden, aber auch um Ansatzpunkte für neue Dimensionen zu liefern, wenn neue Techniken diese erfordern.

Implementierungsaufwand

Der zu erwartende Aufwand bei der Implementierung einer Interaktionstechnik kann insbesondere für unerfahrene Entwickelnde eine nützliche Information sein, wenn eine Technik für ein Anwendungsszenario ausgewählt werden soll. Csisinko und Kaufmann (2003) haben eine hilfreiche Klassifikation entwickelt, nach der Techniken hinsichtlich ihrer Unterstützung durch Tracking Middleware eingeteilt werden können. Umso mehr Aspekte einer Technik von einer Middleware abgedeckt werden, umso weniger zusätzliche Funktionalitäten müssen in der Anwendung durch die Entwickelnden umgesetzt werden. Dies hilft allerdings nicht, den notwendigen Aufwand der zu implementierenden Funktionalitäten abzuschätzen. In einer Bachelorarbeit (Golombek, 2020), die im Zusammenhang zu dieser Arbeit entstanden ist, wurden Metriken identifiziert, anhand derer der Implementierungsaufwand von Interaktionstechniken unterschieden werden kann. Dabei stellte sich heraus, dass der Implementierungsaufwand von vielen Faktoren abhängig ist, die allerdings unabhängig von der umzusetzenden Technik sind, wie die Entwicklungsumgebung bzw. die verwendete Programmiersprache, die Existenz von unterstützenden Bibliotheken oder Frameworks und der Erfahrungsstand der Entwickelnden. Insbesondere der Erfahrungsstand der Entwickelnden führt eine subjektive Komponente ein. Für die meisten Interaktionstechniken steht des Weiteren nur eine Beschreibung der Funktionsweise und keine Beispielimplementierung zur Verfügung, auf deren Basis man Metriken anwenden könnte, die den Aufwand bestimmen lassen. Aus diesen Gründen wurde sich dagegen entschieden, diese Dimension mit in die Taxonomie aufzunehmen.

Direktheit

In den früheren Versionen der Taxonomie wurde noch die Dimension Direktheit verwendet (Weise et al., 2019; Weise, Zender & Lucke, 2020). Diese gibt an, ob sich die Interaktion mit einem virtuellen Objekt so anfühlt, als würde man dieses direkt manipulieren oder z.B. die Verwendung von zusätzlichen Manipulationswerkzeugen oder Buttons die Interaktion indirekt wirken lassen (LaViola et al., 2017). Auch eine semi-direkte Interaktion ist möglich, wenn diese auf den ersten Blick indirekt wirkt, sich aber nach kurzer Nutzung direkt anfühlt (Jerald, 2016). *World In Miniature* (Wingrave et al., 2006) kann z.B. als semi-direkt angesehen werden, da hier mit Stellvertreterobjekten interagiert wird und somit Objekte indirekt manipuliert werden, aber die Interaktion mit diesen Objekten sich schnell direkt anfühlt. Es wird vermutet, dass verschiedene Nutzende die Direktheit von Techniken unterschiedlich bewerten könnten. Da die Taxonomie aber eine möglichst objektive Einschätzung von Techniken erlauben soll, würde diese Dimension hinderlich sein. Des Weiteren gibt es einige Überschneidungen mit anderen Dimensionen der Taxonomie. So sind Techniken, die auf der Metapher des Greifens basieren, in der Regel direkte Techniken und Zeige-Techniken meist indirekt. Auch die Natürlichkeit einer Technik ist meist geringer bei indirekten Techniken. Dies führte dazu, dass die Dimension wieder entfernt wurde.

Bezugsrahmen

In der ersten veröffentlichten Version der Taxonomie war der Bezugsrahmen Teil der Taxonomie (Weise et al., 2019). Dabei werden die Techniken in exozentrisch und egozentrisch eingeteilt (Poupyrev et al., 1998). Dies bedeutet, dass entweder aus einer eher außenstehenden Perspektive mit den virtuellen Objekten interagiert wird oder von innerhalb der virtuellen Umgebung. Es fällt schwer, diese Einteilung auf Techniken für VR-Anwendungen abzubilden, da VR inhärent eine eher egozentrische Perspektive ermöglicht. Nach Poupyrev et al. (1998) zählen nur wenige Techniken, wie z.B. *World In Miniature* (Wingrave et al., 2006), zu den exozentrischen Techniken. Mittlerweile gibt es zwar viele VR-Spiele, die aus einer externen Sicht gesteuert werden, wie z.B. Moss⁴, wo man die Spielwelt als außenstehendes Wesen manipuliert, um so der Spielfigur das Weiterkommen zu ermöglichen, allerdings ist hier der Bezugsrahmen nicht auf die verwendeten Interaktionstechniken abbildbar, sondern auf deren Integration in die Anwendung. Der Bezugsrahmen sollte somit eher unabhängig von den Interaktionstechniken gesehen werden und wurde aus diesem Grund wieder aus der Taxonomie entfernt.

Compliance

Compliance ist eine weitere Dimension, die in der ersten veröffentlichten Version der Taxonomie Anwendung fand (Weise et al., 2019), und kann in Positional Compliance, Directional Compliance und Nulling Compliance unterteilt werden (Jerald, 2016). Die Positional Compliance beschreibt, ob die Position des erfassten Körperteils mit der Position der virtuellen Darstellung übereinstimmt. Directional Compliance deckt dies für

⁴<https://playstation.com/de-de/games/moss-ps4>, letzter Abruf 21.02.2021

die Rotation ab. Die Nulling Compliance gibt an, ob die Position der virtuellen Darstellung eines erfassten Körperteils die initiale Position/Rotation einnimmt, wenn dieses zum Startpunkt zurückkehrt. Dies wird direkt durch die Abbildungsfunktion bestimmt. Bei einer isomorphen Technik ist die Compliance somit gegeben, während dies bei einer nicht-isomorphen Technik nicht der Fall ist. Die Kategorie bietet darüber hinaus keinen Mehrwert und wurde aus diesem Grund wieder entfernt.

Grundtechniken und Erweiterungen

Eine mögliche weitere Dimension könnte grundlegende Techniken als Grundtechniken definieren und Techniken, die auf diesen aufbauen und zusätzliche Funktionalitäten bieten, als Erweiterungen deklarieren. Kandidaten für Grundtechniken sind z.B. *Virtual Hand* und *Ray-Casting. Go-Go* wäre entsprechend eine Erweiterung der *Virtual Hand*, da diese die Reichweite vergrößert. Wingrave (2009) spricht in diesem Zusammenhang auch von *Flavors*, was als Varianten bestehender Techniken aufgefasst werden kann. Diese Zuordnung ist allerdings nicht immer trivial, da hybride Techniken z.B. auf mehreren Techniken aufbauen. Auch kann es ein, dass eine Erweiterung wiederum durch eine andere Technik erweitert wird, wodurch eine baumartige oder netzartige Struktur entsteht. Eine sinnvollere Herangehensweise wäre daher, eher ähnliche Techniken anzugeben, worauf in Kapitel 6.2 eingegangen wird.

Effektive Abbildungsfunktion

Wie bereits in Kapitel 3.2.6 angemerkt, bezieht sich die Abbildungsfunktion bei der Selektion auf das Selektionswerkzeug und bei der Manipulation auf das zu manipulierende Objekt. Bei einigen Selektionstechniken kann die Abbildungsfunktion für den eigentlichen Selektionspunkt aber stark von der Abbildungsfunktion für das verwendete Werkzeug abweichen (Moore et al., 2018). Beim *Ray-Casting* werden die Bewegungen z.B. isomorph auf den Lichtstrahl abgebildet, aber der eigentliche Selektionspunkt liegt aufgrund der Länge des Lichtstrahls woanders (Kopper et al., 2010). In der ersten Version der Taxonomie wurde hierfür noch die CD-Ratio des Ziels als eigene Kategorie geführt (Weise et al., 2019). Hierbei ist allerdings nur eine Unterscheidung in isomorph oder nicht-isomorph möglich, da die tatsächliche Abbildungsfunktion für den Selektionspunkt vom verwendeten Selektionswerkzeug abhängt. Es wurde sich dafür entschieden, diese Dimension nicht weiter zu verwenden, da sie kaum einen Mehrwert bietet und die Komplexität der Taxonomie unnötig erhöhen würde.

Kapitel 4

Evaluation ausgewählter Interaktionstechniken

Um sich der zweiten Teilfrage „Welche Randbedingungen werden durch die Techniken hinsichtlich ihrer Anwendung spezifiziert?“ zu nähern, ist es nötig, mehrere Techniken in verschiedenen Anwendungsszenarien zu untersuchen. Aus diesem Grund wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Studie durchgeführt, in der mehrere Techniken durch Selektions- und Manipulationsaufgaben evaluiert und miteinander verglichen wurden. Die Ergebnisse der Teilstudie zu den Selektionstechniken sind bereits veröffentlicht (Weise, Zender & Lucke, 2020). In dieser Arbeit soll die komplette Studie im Detail besprochen und ausgewertet werden. Dazu wird diese zuerst motiviert und die Auswahl der evaluierten Interaktionstechniken wird erläutert. Anschließend werden der Aufbau sowie die Durchführung der Studie besprochen, gefolgt von der Präsentation und Diskussion der Ergebnisse. Abschließend werden die Erkenntnisse zusammengefasst, wobei Ergebnisse aus vorherigen Arbeiten unterstützt und neue Hypothesen aufgestellt werden.

4.1 Motivation

Mit der im vorherigen Kapitel vorgestellten Taxonomie steht ein Werkzeug zur Verfügung, das es ermöglicht, auf Basis der Eigenschaften einer Interaktionstechnik zu entscheiden, ob diese Technik in einem konkreten Anwendungsszenario eingesetzt werden kann. Alleinstehend kann die Taxonomie allerdings nicht bei der Entscheidung unterstützen, welche Interaktionstechnik von mehreren in einem Anwendungsszenario nutzbaren Techniken hinsichtlich eines Performanzkriteriums (z.B. Geschwindigkeit oder Usability) besser geeignet ist. Um Vor- und Nachteile von Interaktionstechniken zu identifizieren, ist es unerlässlich, das Verhalten der Techniken unter verschiedenen Rahmenbedingung mit Nutzenden zu überprüfen (Bowman, Gabbard & Hix, 2002). Aus diesem Grund wurde eine Studie mit mehreren Testpersonen durchgeführt, in der eine Auswahl von Techniken in verschiedenen Anwendungsszenarien und hinsichtlich verschiedener Performanzkriterien miteinander verglichen wurde. Mit Hilfe der Studie sollen Indizien gefunden werden, die auf Vor- und Nachteile von aus der vorgestellten Taxonomie ableitbaren Merkmalen

hindeuten. Aus diesen Indizien werden dann Hypothesen abgeleitet, die in nachfolgenden spezifischeren Studien untersucht werden können.

Es existieren bereits einige Arbeiten, in denen vergleichende Studien zu Selektions- und Manipulationstechniken ausgewertet werden. Um diese zu identifizieren, wurde eine systematische Literaturanalyse durchgeführt. Details zum Vorgehen und eine Aufschlüsselung der in den Studien verwendeten unabhängigen Variablen wurden in (Weise & Zender, 2019) veröffentlicht. Die systematische Literaturanalyse soll hier nicht im Detail aufgegriffen werden, aber die Ergebnisse sollen dazu dienen, den Nutzen und den Aufbau der durchgeführten Studie zu begründen. Eine Vielzahl der gefundenen Studien vergleicht eine neu entwickelte Technik mit einer geringen Anzahl (zumeist nur einer) von bestehenden Techniken (siehe z.B. Bossavit et al. (2014); Moore et al. (2018); Wilkes und Bowman (2008)). Dabei werden oft Szenarien gewählt, in denen ein besseres Abschneiden der neu entwickelten Technik erwartbar ist. Dies ist naheliegend, denn Techniken werden meist entwickelt, um spezifischen Problemen zu begegnen, wie z.B. das Selektieren von teilweise verdeckten Objekten oder das Manipulieren von Objekten auf hoher Distanz. Die Vorteile der Technik müssen dann in entsprechenden Szenarien nachgewiesen werden. Dies erschwert es allerdings, Rückschlüsse über die allgemeine Eignung einer Technik zu ziehen, da möglicherweise Szenarien nicht überprüft werden, wo diese sich nachteilig verhält. Die hier durchgeführte Studie soll helfen, Stärken und Schwächen von Techniken in bisher nicht überprüften Szenarien aufzuzeigen. Es ist ebenfalls nachvollziehbar, dass in den gefundenen Studien nur wenige Techniken überprüft werden, da sich mit jeder zusätzlichen Technik der Zeitaufwand und die Anzahl der benötigten Testpersonen stark erhöhen können. Es ist nur eine Studie bekannt, in der eine große Anzahl an Techniken miteinander verglichen wurde, um den Gestaltungsraum von Interaktionstechniken zu erforschen (siehe Bowman et al. (1999)).

Somit wurde sich entschieden, eine Vielzahl von Techniken in einer kontrollierten Umgebung miteinander zu vergleichen. Dabei wird aktuelle Hardware verwendet, und die Resultate sollen in der Diskussion deskriptiv mit den teilweise vor Jahrzehnten durchgeführten Studien in Verbindung gesetzt werden. So können Daten gesammelt werden, die Indizien zur Eignung einer größeren Anzahl an Techniken in unterschiedlichen Szenarien und mit einem aktuellen VR-System liefern. Dabei stehen die Interaktionstechniken im Vordergrund und Einflüsse durch unterschiedliche Ein- und Ausgabegeräte und schlechter Sensorik sollen vermieden werden. Zudem werden einige bisher kaum oder gar nicht evaluierte Techniken in dieser Studie untersucht.

Um die angesprochene hohe Anzahl an Techniken in verschiedenen Szenarien miteinander vergleichen zu können, wurde ein exploratives Studiendesign gewählt. Es wurden keine Hypothesen aufgestellt und es wird eine deskriptive und explorative Statistik genutzt, um die Ergebnisse zu untersuchen. „Die deskriptive Statistik beschränkt sich auf die zusammenfassende Darstellung von Daten und verarbeitet diese zu Informationen.“ (Cleff, 2011) Im Vergleich zur Inferenzstatistik wird hier also nicht versucht, signifikante Unterschiede in den Daten zu finden und Schlüsse auf die Gesamtheit zu ziehen, sondern die Daten sollen durch Grafiken und Tabellen aufbereitet werden. „Die explorative (erkundende) Statistik hat darüber hinaus zum Ziel, bisher unbekannte Strukturen und Zusammenhänge in den Daten zu finden und hierdurch neue Hypothesen zu generieren.“ (Steland, 2007) Entsprechend werden die in dieser Studie gefundenen Indizien genutzt, um neue Hypothesen zu formulieren. Neben der Verwendung von Grafiken können in der explorativen

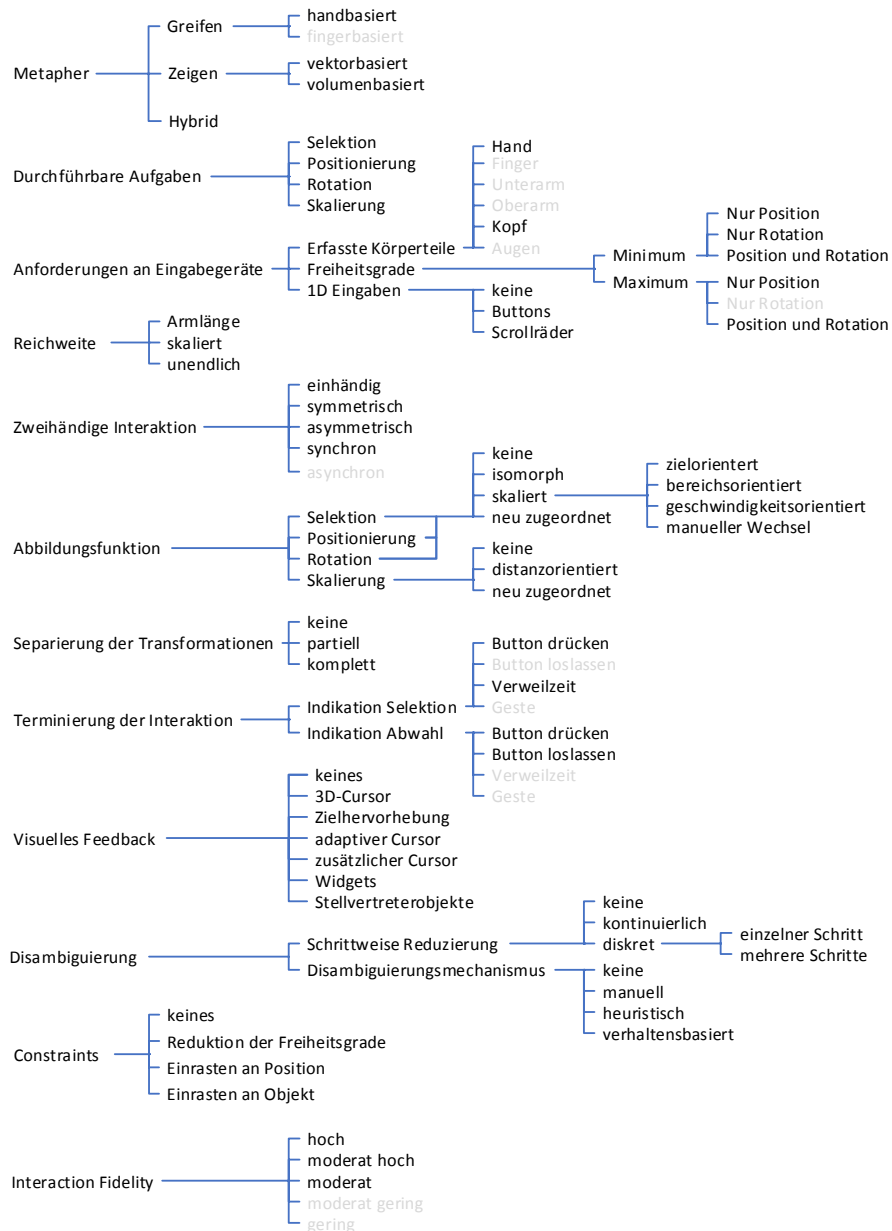


Abbildung 4.1: Vereinfachte Taxonomie mit in der Studie nicht abgedeckten Dimensionen (grau).

Statistik auch Korrelationen berechnet werden (Schäfer, 2010). Auf dieses Hilfsmittel wird in dieser Arbeit bei der Auswertung der Ergebnisse zurückgegriffen.

4.2 Ausgewählte Interaktionstechniken

Bei der Auswahl der Techniken stand deren Vielfältigkeit im Fokus, um ein breites Spektrum an Techniken miteinander vergleichen zu können. Die erstellte Taxonomie deckt diese Vielfältigkeit ab, weshalb die Techniken so gewählt wurden, dass eine möglichst hohe An-



Abbildung 4.2: Buttons des Controllers.

zahl an Ausprägungen der verschiedenen Dimensionen abgedeckt wird. So ist es möglich, wie eingangs angesprochen, Rückschlüsse auf die Merkmale von Interaktionstechniken zu ziehen. Bei einigen wenigen Dimensionen mussten die Ausprägungen verallgemeinert werden, da es nicht zielführend wäre, alle möglichen Kombinationen durch Techniken abzudecken. So wird bei den Dimensionen *maximale* und *minimale Freiheitsgrade* jede von der Technik unterstützte Achse einzeln für die Position und Rotation angegeben. Es ist nicht möglich für jede Kombination aus Achsen eine Technik zu finden, weshalb hier die repräsentativen Kategorien *nur Position*, *nur Rotation* und *Position und Rotation* gewählt wurden. Bei der Dimension *Interaction Fidelity* werden außerdem nicht die einzelnen Unterdimensionen betrachtet, sondern nur der kumulierte Wert, der eine Beurteilung der Natürlichkeit zwischen gering und hoch ermöglicht. In Abbildung 4.1 ist die verallgemeinerte Taxonomie dargestellt. Die dort grau gedruckten Aspekte konnten von keiner Interaktionstechnik abgedeckt werden. Auf die Gründe hierfür wird im Folgenden eingegangen.

In einer kleinen Vorstudie, die dem Test des Versuchsaufbaus diente, wurden auch Techniken getestet, die auf Bewegungen der Finger oder der Augen basieren. Hierfür wurde auf Eingabegeräte gesetzt, die die entsprechenden Körperpartien erfassen können. In diesem Fall waren das die Leap Motion für die Finger und der Pupil Labs HTC Vive Eye-Tracker für die Augen. Es stellte sich schnell heraus, dass das Tracking dieser Geräte noch zu unzuverlässig ist. Dies hätte die Ergebnisse verfälscht, da die Techniken vermutlich aufgrund der Eingabegeräte schlechter abgeschnitten hätten und nicht aufgrund ihrer eigenen Charakteristiken, was, wie eingangs erwähnt, vermieden werden sollte. Aus diesem Grund wurden die entsprechenden Techniken ausgeschlossen. Somit gibt es keine Vertreter für die Ausprägung *fingerbasiert* in der Dimension *Metapher*, genau wie es auch keine Vertreter für die Ausprägungen *Finger* und *Augen* in der Kategorie *Erfasste Körperteile* gibt. Für die Erfassung des Ober- und Unterarms wäre nur eine Microsoft Kinect nutzbar gewesen, die bekanntermaßen ebenfalls nicht ausreichend zuverlässige Ergebnisse liefert, weshalb es auch hierfür keine Vertreter gibt. Die *Crank Handle* Technik, die später in diesem Kapitel im Detail erklärt wird, wurde angepasst, sodass sie mit Controllern anstatt durch Gestensteuerung nutzbar ist. Die Dimension *Interaction Termination* wurde erst nach Beginn der Studie hinzugefügt, weshalb hier nicht alle Ausprägungen abgedeckt werden konnten. Unter den untersuchten Techniken gibt es keine Technik, die bei den *maximalen Freiheitsgraden* nur die Rotation unterstützt, weshalb es auch hier keinen Vertreter gibt.

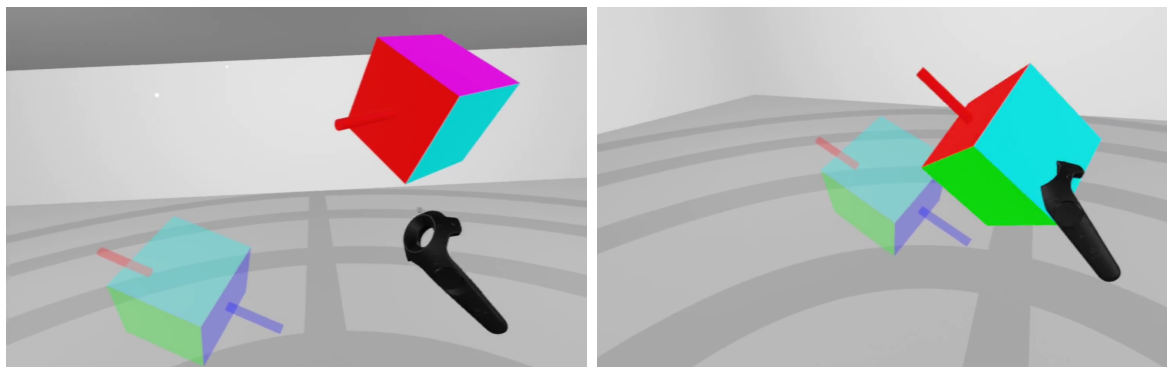


Abbildung 4.3: *Simple Virtual Hand*. Links: Cursor mit Selektions- und Manipulationspunkt. Rechts: Veränderung der Position und Rotation des Objekts.

Des Weiteren wurden keine asynchronen Techniken getestet, da das entsprechende Merkmal nur *Asymmetric Bimanual Gestural Interface* und *Marker Cone* besitzen. Die erste Technik erfordert die Erfassung der Finger und *Marker Cone* ist eine weitere Selektionstechnik, die sich ähnlich wie die ausgewählte *Flashlight* Technik verhält und deshalb nicht getestet wurde. Alle Techniken haben außerdem mindestens eine moderate *Interaction Fidelity*, weil sie auf Bewegungen im dreidimensionalen Raum basieren, weshalb es in der Studie keine Techniken mit einer geringeren *Interaction Fidelity* gibt. Eine detaillierte Angabe zu den Merkmalen der ausgewählten Techniken kann dem Anhang A.2 entnommen werden. Die Studie stellte außerdem eine gute Möglichkeit dar, um bestehende Techniken gezielt zu erweitern, um deren Einsatzmöglichkeiten und Usability zu verbessern. Mit *Scaled HOMER + Scale* und *Scaled Scrolling World In Miniature + Scale* wurden zwei Techniken speziell für die Studie entwickelt, um auch die Taxonomie besser abdecken zu können. Auf die genauen Anpassungen wird in den folgenden Erklärungen der einzelnen Techniken eingegangen.

Insgesamt wurden 12 Techniken für die Studie ausgewählt. Davon unterstützen 11 Techniken die Selektion, wobei *Scaled HOMER* und *Scaled HOMER + Scale* bei der Selektion identisch sind und somit 10 Techniken in der Selektionsstudie verwendet wurden. Acht der Techniken unterstützen die Manipulation und wurden deshalb in der Manipulationsstudie verglichen. Im Folgenden werden die Techniken im Detail beschrieben und es wird auf deren Umsetzung in der Testanwendung eingegangen. Die Buttons des Controllers, auf die sich in den folgenden Beschreibungen bezogen wird, sind in Abbildung 4.2 markiert. Anhand der Beschreibungen der Techniken in den zugehörigen wissenschaftlichen Arbeiten war es nicht immer möglich, die Implementierungen vollständig zu reproduzieren. Teilweise mussten Annahmen getroffen werden oder Parameter durch eigene Tests bestimmt werden. Hierauf wird in den folgenden Beschreibungen der Techniken eingegangen. Für Implementierungsdetails wird auf die Veröffentlichung der Testanwendung verwiesen (siehe Kapitel 5.3).

Simple Virtual Hand

Die *Simple Virtual Hand* Technik (LaViola et al., 2017) erlaubt die Selektion, Positionierung und Rotation von Objekten auf kurze Distanz. Die Bewegungen des Controllers in der dominanten Hand werden isomorph auf eine virtuelle Darstellung des Controllers

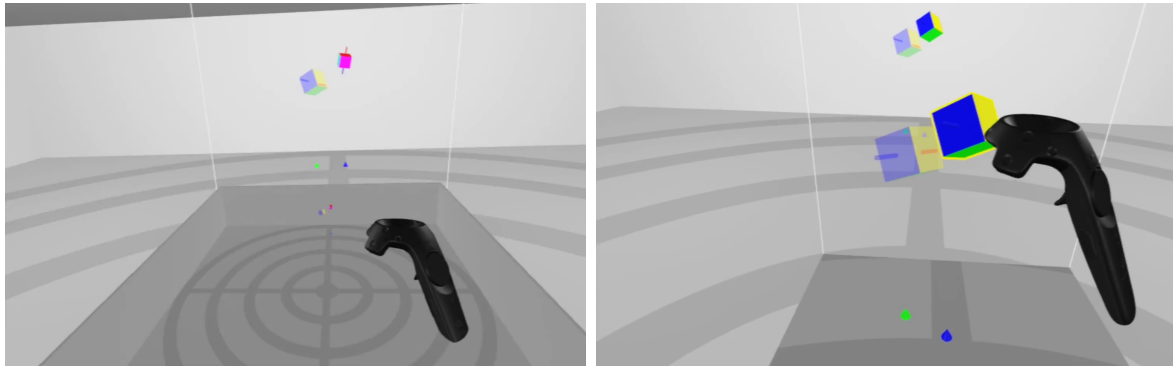


Abbildung 4.4: *Scaled Scrolling Worlds in Miniature + Scale*. *Links:* Miniaturmodell in der linken Hand und Darstellung des Controllers in der rechten Hand. *Rechts:* Interaktion im vergrößertem Miniaturmodell.

abgebildet. Vorne am Controller ist eine kleine Kugel angebracht, die als Selektions- und Manipulationspunkt fungiert und in Abbildung 4.3 (links) zu sehen ist. Befindet sich diese Kugel in einem Objekt, kann dieses durch Drücken des Triggers selektiert werden. Solange der Trigger gedrückt bleibt, kann das Objekt positioniert und rotiert werden (siehe Abbildung 4.3 (rechts)). Der zweite Controller ist nicht in der virtuellen Umgebung sichtbar.

Scaled Scrolling Worlds in Miniature + Scale

Diese Technik basiert auf der *Scaled Scrolling Worlds in Miniature* Technik (Wingrave et al., 2006) und wurde für diese Studie um die Möglichkeit des Skalierens erweitert. Somit sind mit dieser Technik alle Aufgaben auf allen Distanzen durchführbar. In der nicht dominanten Hand befindet sich ein Miniaturmodell der virtuellen Welt und der sich darin befindlichen Objekte (siehe Abbildung 4.4 (links)). Weiße Linien visualisieren die Grenzen des Miniaturmodells, welches eine Größe von 50x50x50 cm hat. Der Controller in der nicht dominanten Hand wird nicht in der virtuellen Umgebung dargestellt, aber dessen Position wird auf die Position des Miniaturmodells übertragen. Die Drehung wird nicht übertragen, wodurch das Miniaturmodell die Rotation relativ zur virtuellen Welt beibehält. Wie bei der *Simple Virtual Hand* Technik werden die Position und Rotation des Controllers in der dominanten Hand auf ein virtuelles Ebenbild übertragen. Auch hier befindet sich eine kleine Kugel vorne am Controller, die als Selektions- und Manipulationspunkt fungiert. Befindet sich der Controller in den Grenzen des Miniaturmodells, ohne ein Objekt zu berühren, kann das Miniaturmodell verschoben werden, solange der Trigger gedrückt gehalten wird. Das Modell kann nicht in der Höhe verschoben werden, wodurch der Boden immer sichtbar bleibt und als Orientierung dient. Fährt der Daumen der nicht dominanten Hand nach oben oder unten über das Touchpad des Controllers, wird das Miniaturmodell vergrößert oder verkleinert (siehe Abbildung 4.4 (rechts)). Befindet sich dabei der andere Controller in den Grenzen des Miniaturmodells, wird um den Auswahlpunkt des Controllers skaliert. Andernfalls wird um das Zentrum des Miniaturmodells skaliert. Auch beim Skalieren wird sichergestellt, dass der Boden des Miniaturmodells sichtbar bleibt. Überschneidet sich der Auswahlpunkt mit einem Objekt, kann dieses selektiert und solange der Trigger gedrückt bleibt, auch positioniert und rotiert werden. Wird mit dem Daumen

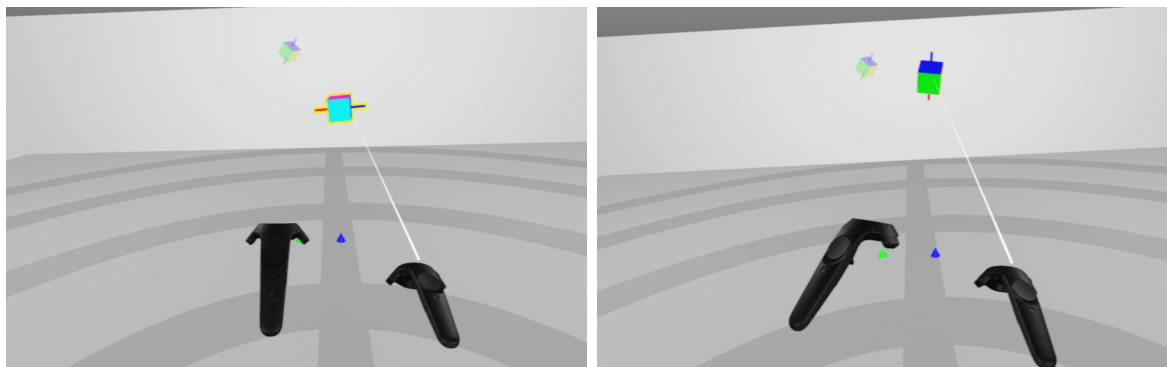


Abbildung 4.5: *Bimanual Fishing Reel + Scale*. Links: Selektion des Objekts mit einem Lichtstrahl. Rechts: Drehung des am Lichtstrahl gehefteten Objekts mit dem linken Controller.

der nicht dominanten Hand über das Touchpad gefahren, während ein Objekt mit dem anderen Controller gehalten wird, verändert sich die Größe der Miniaturwelt, aber nicht die Größe des gehaltenen Objekts. So kann das Objekt indirekt vergrößert oder verkleinert werden. Bei dieser Technik kann ausschließlich mit den Objekten in der Miniaturwelt interagiert werden und nicht mit den eigentlichen Objekten.

Bimanual Fishing Reel + Scale

Bimanual Fishing Reel + Scale ermöglicht die Selektion, Positionierung und Rotation von Objekten auf allen Distanzen. Eine Visualisierung der Technik ist in Abbildung 4.5 zu sehen. Mit einem Lichtstrahl, der von der dominanten Hand ausgeht, kann ein Objekt durch das Drücken des Triggers selektiert werden. Dabei ist zu beachten, dass der Lichtstrahl nicht durchgängig ist, sondern zum Ende hin transparent wird. Ein selektiertes Objekt bleibt am Lichtstrahl befestigt, ohne dass der Trigger gedrückt bleiben muss. Wird der Lichtstrahl währenddessen bewegt, bewegt sich entsprechend auch das angeheftete Objekt mit. Durch das Drücken auf die obere oder untere Hälfte des Touchpads des Controllers in der dominanten Hand wird das Objekt auf dem Lichtstrahl von der Testperson weg oder zur Testperson hin bewegt. Wird auf die linke oder rechte Hälfte des Controllers gedrückt, wird das Objekt verkleinert bzw. vergrößert. Durch das Drücken des Triggers des Controllers in der nicht dominanten Hand wird die Rotation des Controllers auf das Objekt übertragen, solange der Trigger gedrückt bleibt. Sobald der Trigger des Controllers in der dominanten Hand erneut gedrückt wird, wird das Objekt losgelassen.

Flashlight

Flashlight (Liang & Green, 1994) ermöglicht die Selektion von Objekten auf allen Distanzen. Dafür wird ein Kegel mit einer Länge von sieben Metern genutzt, der von der dominanten Hand ausgeht (siehe Abbildung 4.6 (links)). In der Literatur sind keine Angaben oder Untersuchungen zur optimalen Größe des Kegels zu finden. Auch in Arbeiten zu anderen volumenbasierte Techniken, die einen Kegel verwenden, werden hierzu in der Regel keine Angaben gemacht. Nur für die Technik *Precious* (Mendes et al., 2017), bei der

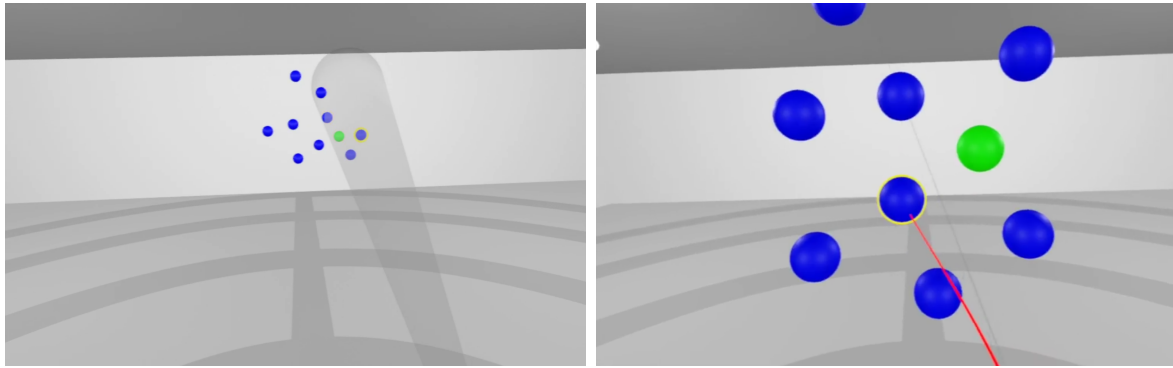


Abbildung 4.6: *Flashlight* und *IntenSelect*. *Links:* Selektionsvolumen der Flashlight Technik. *Rechts:* An ein Objekt gehefteter roter Lichtstrahl der IntenSelect Technik.

die Größe des Kegels veränderbar ist, wird ein Öffnungswinkel von mindestens 7 Grad und maximal 15 Grad angegeben. Aber auch hier wird keine Begründung für diese Werte gegeben. Für die Studie wurde versucht, sich an den Abbildungen in der Arbeit von Liang und Green (1994) zu orientieren und nach eigenen Tests wurde sich für einen Öffnungswinkel von 12,5 Grad entschieden.

Da potenziell mehrere Objekte in das Selektionsvolumen fallen können, wird beim Betätigen des Triggers das Objekt ausgewählt, welches sich am nächsten zum Zentrum des Kegels befindet. Diese Methode wurde gewählt, da es die simpelste Form der Disambiguierung ist und die Techniken in einer Vielzahl von Arbeiten so beschrieben wird (siehe z.B. Argelaguet und Andujar (2013); Baloup et al. (2019); Dörner et al. (2013)). In der ursprünglichen Arbeit von Liang und Green (1994) wird zusätzlich das nähere Objekt zum Ausgangspunkt des Kegels bevorzugt, wenn der Winkel zwischen dem Objekt und der zentralen Achse des Kegels für zwei Objekte gleich ist. Das dürfte in dieser Studie aber keine Auswirkungen haben, da alle Objekte einer Aufgabe in gleicher Distanz zum/zur Nutzer/in platziert wurden.

IntenSelect

IntenSelect (De Haan et al., 2005) ermöglicht die Selektion von Objekten auf allen Distanzen. Dabei geht ein grauer Lichtstrahl von der dominanten Hand aus. Ein weiterer roter Lichtstrahl heftet sich an das Objekt, das die Testperson meinen könnte (siehe Abbildung 4.6 (rechts)). Sobald der Trigger gedrückt wird, wird dieses Objekt ausgewählt. Um zu bestimmen, an welches Objekt sich der rote Lichtstrahl heftet, werden die Objekte bewertet. Der hierfür verwendete Algorithmus ist der Arbeit von De Haan et al. (2005) entnommen und wird im Folgenden nur oberflächlich erläutert. De Haan et al. (2005) geben keine konkreten Parameter an, weshalb die im Folgenden genannten Werte auf Basis von Tests und durch die Orientierung an anderen Techniken bestimmt wurden.

Um die potentiell selektierbaren Objekte zu bestimmen, wird ein unsichtbarer Kegel verwendet, der, wie der eigentliche Lichtstrahl, von der dominanten Hand ausgeht und einen Öffnungswinkel von 15 Grad hat. Je dichter sich ein Objekt am Zentrum des Kegels (grauer Lichtstrahl) befindet, desto höher wird dieses bewertet. Dabei werden Objekte, die sich weiter weg vom Ausgangspunkt des Kegels befinden, geringfügig bevorzugt. Die Objekte

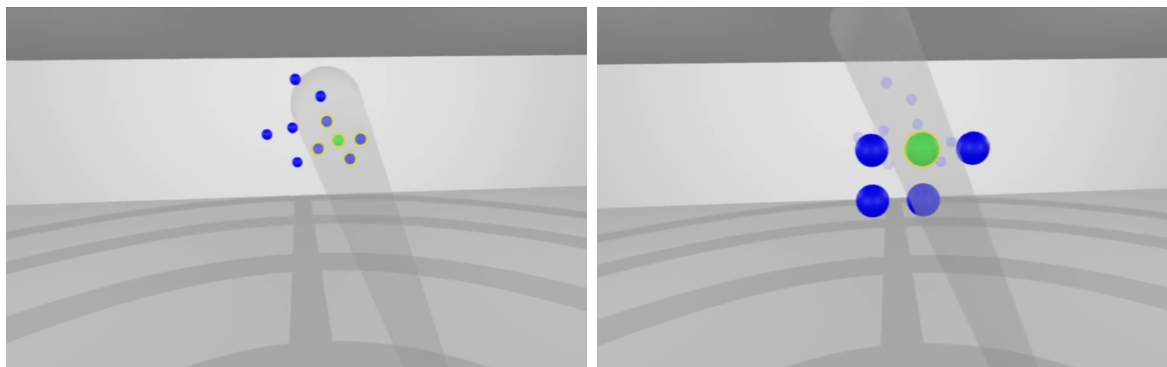


Abbildung 4.7: *Expand*. *Links*: Mehrere Objekte im Selektionskegel. *Rechts*: Anordnung der selektierten Objekte im Raster.

werden 50 Mal pro Sekunde bewertet. Dabei werden die Bewertungen akkumuliert, indem 90 % der aktuellen Bewertung und 90 % des vergangenen akkumulierten Wertes addiert werden. Verlässt ein Objekt den Kegel, wird die Bewertung auf 0 zurückgesetzt. Der rote Lichtstrahl heftet sich immer an das Objekt mit der aktuell höchsten akkumulierten Bewertung.

Expand

Expand (Cashion et al., 2012) ist eine mehrstufige Selektionstechnik, die es in der ersten Phase ermöglicht, mehrere Objekte auszuwählen, um dann in der zweiten Phase die Auswahl des Zielobjekts zu vereinfachen. Die Technik kann auf allen Distanzen verwendet werden. Ursprünglich wurde *Expand* für die Darstellung auf einem 2D-Monitor entwickelt und verwendet dort einen kreisförmigen Cursor für die Selektion der Objekte, der auf der Ebene des Bildschirms bewegt wird. Es wäre nicht zielführend, diese Form des Cursors 1 zu 1 für VR zu übernehmen, da hierfür eine zusätzliche imaginäre Ebene vor der Testperson erzeugt werden müsste, auf der der Cursor bewegt wird. Angelehnt an die Umsetzung von *Expand* in einer Arbeit von Cashion et al. (2013) und um die zusätzliche Räumlichkeit zu nutzen, die VR bietet, wurde sich für die Evaluation dafür entschieden, einen Kegel zu verwenden, wie es auch bei der *Flashlight* Technik der Fall ist. Mangels fehlender Daten zur optimalen Größe des Kegels wurde wie bei der *Flashlight* Technik ein Öffnungswinkel von 12,5 Grad gewählt. Der Kegel geht von der dominanten Hand aus.

Die beiden Phasen der Technik sind in Abbildung 4.7 dargestellt. In der ersten Phase werden alle Objekte, die sich mindestens zur Hälfte im Kegel befinden, hervorgehoben. Wird der Trigger betätigt, werden diese Objekte für die zweite Phase in Form eines Rasters einen halben Meter vor der Testperson angeordnet. Dabei werden Kopien der eigentlichen Objekte erstellt und alle Objekte mit Ausnahme derer, die sich im Raster befinden, werden transparent und können nicht selektiert werden. Das Raster wird vor den Augen der Testperson zentriert und in der Größe dynamisch angepasst, sodass es möglichst quadratisch ist. In der zweiten Phase ist nur ein Objekt markierbar und selektierbar. Fallen mehrere Objekte in den Selektionskegel, wird das Objekt hervorgehoben, das sich am nächsten zum Zentrum des Kegels befindet. Das Zielobjekt wird durch erneutes Drücken des Triggers ausgewählt. Wird der Trigger gedrückt, ohne dass sich ein Objekt im Selektionskegel befindet, wird das Raster aufgelöst, ohne ein Objekt auszuwählen. Befindet sich

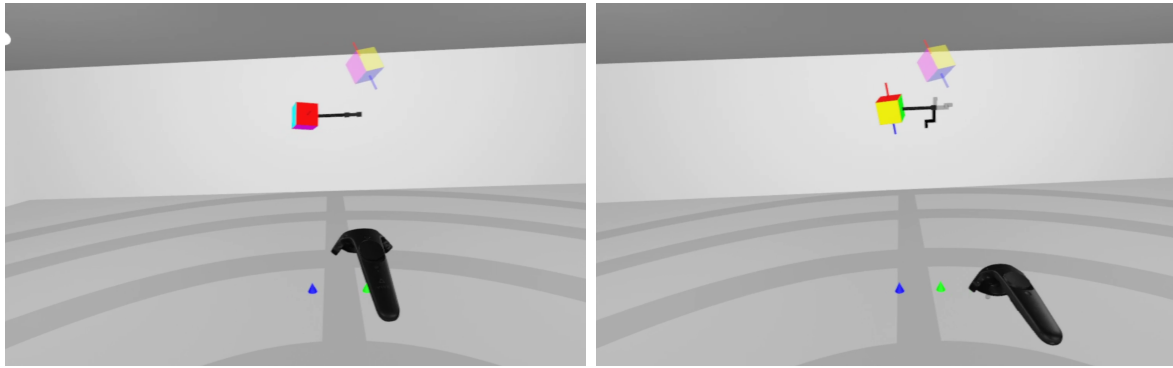


Abbildung 4.8: *Crank Handle*. *Links*: Positionierung des Objekts im Translationsmodus. *Rechts*: Rotation des Objekts im Rotationsmodus.

in der ersten Phase nur ein Objekt im Selektionskegel, wird dieses sofort ausgewählt, da eine Anordnung in einem Raster unnötig ist.

Crank Handle

Crank Handle (Bossavit et al., 2014) ermöglicht ausschließlich die Positionierung und die Rotation von Objekten. Die Technik bietet keine Möglichkeit, ein spezifisches Objekt zu selektieren, weshalb sie nicht in der Selektionsstudie verwendet werden konnte und in der Manipulationsstudie das Objekt automatisch ausgewählt wird. Dadurch kann die Technik allerdings auch auf allen Distanzen eingesetzt werden. In der ursprünglichen Version der Technik basiert die Steuerung auf Gesten, wofür das Öffnen und Schließen der Hand erfasst werden müssen. Wie bereits in Kapitel 4.2 angesprochen, war es nicht möglich, entsprechende Eingabegeräte zu verwenden. Aus diesem Grund wurde die Technik angepasst, um mit den Vive Controllern zu funktionieren. Dies war einfach umzusetzen, da das Öffnen und Schließen der Hände durch das Drücken und Loslassen des Triggers abgebildet werden konnten. *Crank Handle* nutzt zwei getrennte Modi für die Positionierung und die Rotation von Objekten. Eine Stange rechts vom Objekt, die initial transparent ist, verändert sich entsprechend des aktuellen Modus. Wird der Trigger betätigt und gedrückt gehalten, kann das Objekt positioniert werden. Dabei werden die Bewegungen des Controllers 1 zu 1 auf das Objekt übertragen. Die Stange am Objekt wird in diesem Modus undurchsichtig (siehe Abbildung 4.8 (links)). Wird der Trigger losgelassen und innerhalb von 0,6 Sekunden erneut betätigt und gedrückt gehalten, wechselt die Technik in den Rotationsmodus. Hier ist es möglich, das Objekt getrennt um alle primären Raumachsen zu drehen. Dazu muss mit dem Controller eine kreisförmige Bewegung um die entsprechende Achse durchgeführt werden. Wie schnell sich das Objekt dreht, wird durch die Bewegungsgeschwindigkeit des Controllers bestimmt. Unter 10 cm/s wird keine Drehung durchgeführt. Zwischen 10 cm/s und 65 cm/s wird die Rotation linear verstärkt, wodurch bei 10 cm/s 50 reale Drehungen und bei 65 cm/s 30 reale Drehungen nötig sind, um das Objekt komplett zu drehen. Über 65 cm/s wird eine exponentielle Funktion verwendet, die bei 65 cm/s 10 reale Drehungen auf eine komplette Objektdrehung abbildet und auf 2,5 Drehungen beschränkt ist. Im Rotationsmodus werden an der Stange drei transparente Kurbeln angezeigt, die die jeweiligen Achsen darstellen. Wird eine Drehung um eine primäre Achse erkannt, wird die entsprechende Kurbel undurchsichtig (siehe Abbildung

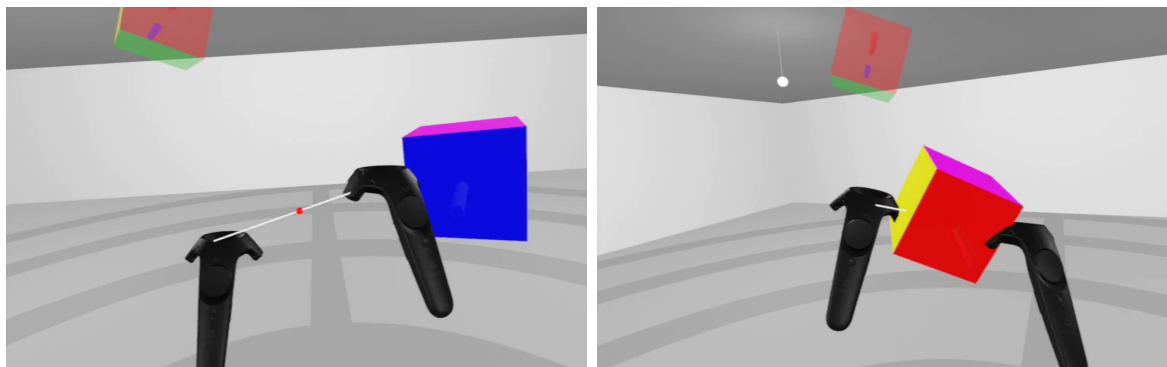


Abbildung 4.9: *Spindle*. *Links:* Achse zwischen den beiden Controllern mit Selektions- und Manipulationspunkt. *Rechts:* Manipulation eines Objekts.

4.8 (rechts)). Alle hier angegebenen Parameter sowie der Algorithmus zum Herleiten der Rotationsachse wurden der Arbeit von Bossavit et al. (2014) entnommen.

Spindle

Spindle (Mapes & Moshell, 1995) ist eine zweihändige Technik, die die Selektion, Positionierung, Rotation und Skalierung von Objekten auf kurze Distanz ermöglicht. Die Technik ist in Abbildung 4.9 dargestellt. Beide Controller werden in der virtuellen Welt angezeigt und sind mit einer weißen Linie verbunden. In der Mitte befindet sich eine rote Kugel, die als Selektions- und Manipulationspunkt fungiert. Wird die Kugel in ein Objekt geführt, kann dieses ausgewählt werden, indem die Trigger beider Controller gleichzeitig gedrückt werden. Werden diese gedrückt gehalten, kann das Objekt entsprechend der Bewegungen der Controller manipuliert werden. Bewegungen in die gleiche Richtung ermöglichen die Positionierung, entgegengesetzte Bewegungen ermöglichen die Drehung, und das Auseinander- bzw. Zusammenführen der Controller ermöglicht die Skalierung des Objekts. Eine Rotation um die Achse, die die beiden Controller verbindet, ist so nicht möglich. Dazu muss das Objekt umgegriffen werden oder die Controller müssen wie bei einer Fahrradbewegung rotierend bewegt werden.

Go-Go + PRISM

Go-Go + PRISM (Auteri et al., 2015) verbindet bereichs- und geschwindigkeitsorientierte Abbildungsfunktionen, indem der Arm verlängert wird, je weiter sich die Hand vom Körper wegbewegt und langsame Bewegungen nochmals verlangsamt werden. So ermöglicht die Technik die Selektion, Positionierung und Rotation von Objekten auf skalierte Distanz und unterstützt alle in der Studie getesteten Entfernungen. Um allen Testpersonen die gleiche Reichweite zu ermöglichen, wird anfangs die Länge des Armes bestimmt, wofür der dominante Arm einmal ausgestreckt werden muss. Bis zu einer Distanz von $2/3$ der Armlänge der Testperson wird die Skalierungsfunktion der *Go-Go* Technik nicht angewendet. Ab einer größeren Distanz wird der Arm nicht-linear verlängert, bis eine Entfernung von maximal 7,2 m bei ausgestrecktem Arm erreicht werden kann (siehe Abbildung 4.10). Die Skalierungsfunktion von PRISM wird vor der Skalierung der *Go-Go* Technik angewendet.

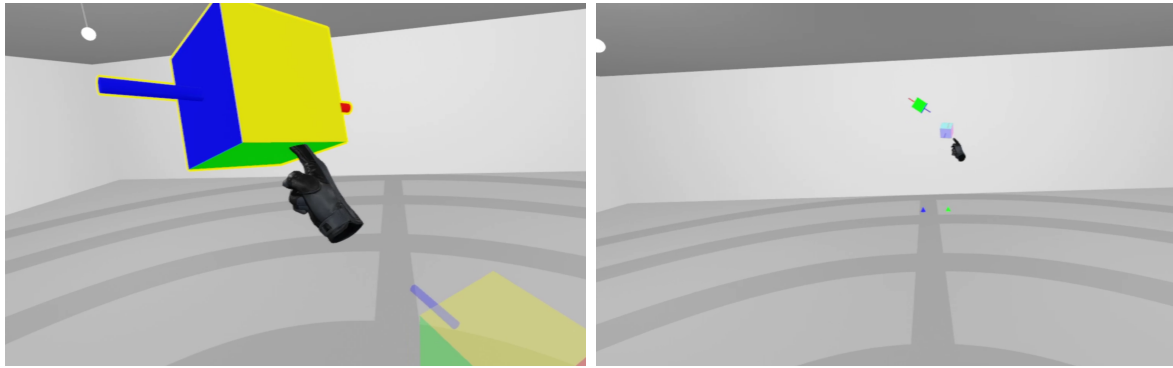


Abbildung 4.10: *Go-Go + PRISM*. *Links:* Selektion eines Objekts mit der Spitze des Cursors. *Rechts:* Verlängerung der Reichweite der Hand.

Unter einer Geschwindigkeit von $0,1 \text{ cm/s}$ wird keine Bewegung übertragen. Zwischen $0,1 \text{ cm/s}$ und 30 cm/s werden die Bewegungen linear skaliert, sodass sich in der Nähe der unteren Geschwindigkeitsbegrenzung das Objekt kaum bewegt und in der Nähe der oberen Geschwindigkeitsbegrenzung die Bewegungen 1 zu 1 übertragen werden. Der dabei entstehende Unterschied zwischen der Position des Controllers und der Position des virtuellen Cursors kann durch schnelle Bewegungen ab 50 cm/s aufgehoben werden. Zwischen 30 cm/s und 50 cm/s wird eine isomorphe Abbildung verwendet.

Die angegebenen Werte wurden bei vorhergehenden Tests ermittelt. Dabei wurde auch festgestellt, dass kleine Kopfbewegungen zu unerwünschten Bewegungen der Hand geführt haben, wenn die Distanz zwischen Hand und Oberkörper dynamisch ermittelt wird. Da die Position des Oberkörpers nur durch die Position des Kopfes hergeleitet werden kann, verändern auch Kopfbewegungen den ermittelten Abstand zwischen Oberkörper und Hand. Um dies zu verhindern, wurde bei der initialen Bestimmung der Armlänge auch die aktuelle Position des Oberkörpers gespeichert, welche anschließend als Basis für die weiteren Interaktionen und für die Berechnungen der Skalierungsfunktion der *Go-Go* Technik verwendet wurde. Größere Abweichungen von dieser Position würden das Verhalten der Technik somit beeinflussen. Dem konnte durch die Verwendung eines eingeschränkten Aktionsraums (siehe Kapitel 4.3) entgegengewirkt werden. Der Cursor wurde, ähnlich wie bei der Originaltechnik, als eine Hand mit ausgestrecktem Zeigefinger dargestellt. Befand sich der Zeigefinger in einem Objekt, konnte dieses durch das Drücken des Triggers selektiert werden. Die Positionierung und Rotation des Objekts waren möglich, solange der Trigger gedrückt blieb. Die Skalierungsfunktionen wurden nur auf die Position des Cursors und somit auch indirekt auf die Positionierung des Objektes angewendet. Die Rotation wurde nicht beeinflusst.

Head-based Selection

Head-based Selection (Mine, 1995b) ermöglicht die Selektion von Objekten auf allen Distanzen. Für diese Studie wurde ein Selektionsmechanismus gewählt, der darauf basiert, dass der Cursor eine bestimmte Zeit auf einem Objekt platziert wird. Nach vorangehenden Tests wurde hierfür ein Wert von einer Sekunde gewählt. Als Cursor wurde eine gelbe Kugel gewählt (siehe Abbildung 4.11). Das Zentrum dieser Kugel befindet sich immer dort, wo sich die Gerade, die durch den Punkt zwischen beiden Augen und der Ausrichtung

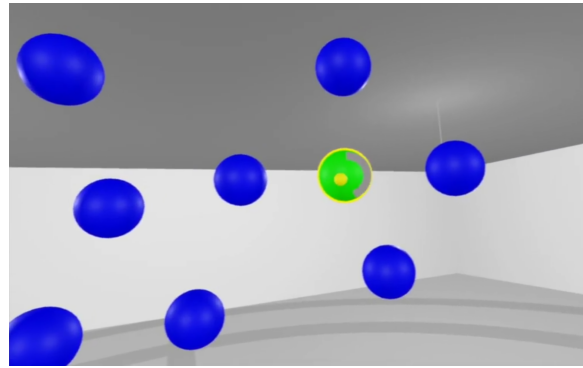


Abbildung 4.11: *Head-based Selection*. Gelbe Kugel als Cursor und grauer Kreis, der die Zeit zur Selektion visualisiert.

des Kopfes bestimmt wird, mit einem Objekt schneidet. Dies schließt Aufgabenobjekte, sowie die Objekte der Umgebung, wie die Wände, mit ein. Während der Cursor sich auf einem Aufgabenobjekt befindet, visualisiert ein sich füllender Kreis die benötigte Zeit bis zur Selektion.

Scaled HOMER

Scaled HOMER (Wilkes & Bowman, 2008) ermöglicht die Selektion von Objekten mit einem Lichtstrahl und die Positionierung und Rotation von Objekten durch eine Variante der *Virtual Hand* Technik. Dadurch kann die Technik auf allen in der Studie verwendeten Distanzen genutzt werden. Für die Selektion von Objekten wird ein weißer Lichtstrahl verwendet, der von der dominanten Hand ausgeht und in Abbildung 4.12 zu sehen ist. Sobald der Trigger gedrückt und gehalten wird, verschwindet der Lichtstrahl und die Bewegungen des Controllers werden auf das Objekt übertragen, was ebenfalls in Abbildung 4.12 erkennbar ist. Hier kommt der Unterschied zur *HOMER* Technik (Bowman & Hodges, 1997) zum Tragen. Anstatt die Bewegungen 1 zu 1 zu übertragen, wird die Geschwindigkeit der Hand durch eine Skalierungskonstante geteilt, um einen Skalierungsfaktor zu erhalten. Dieser wird mit der eigentlichen Geschwindigkeit der Hand multipliziert, um so die skalierte Geschwindigkeit zu berechnen, wodurch die Positionsänderungen des Objekts bestimmt werden. So werden langsame Bewegungen nochmals verlangsamt und schnelle Bewegungen beschleunigt. Je größer die Skalierungskonstante, desto stärker die Auswirkungen der Skalierung. Die maximale skalierte Geschwindigkeit wird allerdings auf das 1,2-fache der eigentlichen Geschwindigkeit beschränkt. Auf die Rotation hat die Skalierung keinen Einfluss. Bis auf die Skalierungskonstante sind alle Parameter aus der Arbeit von Wilkes und Bowman (2008) entnommen, wo auch weitere Details zum implementierten Algorithmus zu finden sind. Die Skalierungskonstante wurde nach eigenen Tests auf 1,5 festgelegt und in der Vorstudie überprüft.

Scaled HOMER + Scale

Scaled HOMER + Scale ist im Rahmen der Arbeit aus der *Scaled HOMER* Technik hervorgegangen, um die Taxonomie besser abdecken zu können. Dafür wurde die Technik um

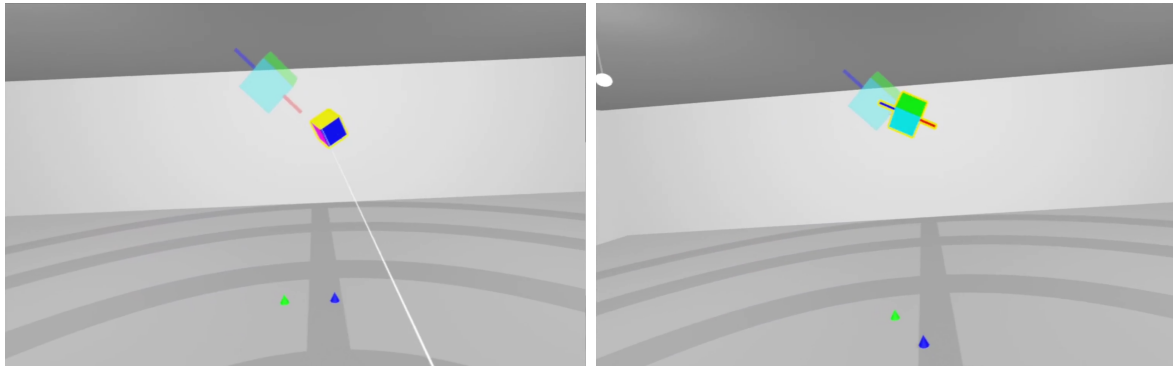


Abbildung 4.12: *Scaled HOMER (+ Scale)*. *Links:* Selektion des Objekts mit einem Lichtstrahl. *Rechts:* Ausgeblendeter Lichtstrahl während der Manipulation.

zwei Mechanismen erweitert. Zum einen wird dieselbe Skalierungsfunktion, die bei *Scaled HOMER* für die Positionierung von Objekten verwendet wird, auch für die Rotation von Objekten verwendet. Langsame Drehungen werden also nochmals verlangsamt und schnelle Drehungen beschleunigt. Zum anderen wird nun auch die Skalierung ermöglicht, indem der Trigger des Controllers in der nicht dominanten Hand gedrückt gehalten werden kann, während ein Objekt gehalten wird, woraufhin der Abstand zwischen beiden Controllern die Größe des Objekts beeinflusst. Werden die Controller zusammen- bzw. auseinandergeführt, wird das Objekt demnach verkleinert bzw. vergrößert. Im Vergleich zu *Scaled HOMER* ist *Scaled HOMER + Scale* somit eine zweihändige Technik, die auch das Skalieren von Objekten ermöglicht. Visuell haben diese Änderungen keine Auswirkung, weshalb die Technik in der Nutzung genauso aussieht wie die in Abbildung 4.12 dargestellte *Scaled HOMER* Technik.

4.3 Studienaufbau

Wie eingangs angesprochen, wurde sich für ein exploratives Studiendesign entschieden. Im Folgenden wird im Detail auf die virtuelle und reale Testumgebung, die unabhängigen und abhängigen Variablen, die Gestaltung der Aufgaben und den Umgang mit verschiedenen Zielsetzungen der Testpersonen eingegangen. Die Studie kann hinsichtlich der zwei getesteten Aufgabentypen Selektion und Manipulation in zwei Teilstudien unterteilt werden, für die einige Aspekte im Folgenden getrennt betrachtet werden.

Um den Studienaufbau zu überprüfen, wurde eine kleine Vorstudie durchgeführt, auf die in den folgenden Unterkapiteln Bezug genommen wird. Die Vorstudie wurde mit vier Angestellten des Lehrstuhls für Komplexe Multimediale Anwendungsarchitekturen der Universität Potsdam durchgeführt, die unterschiedliche Vorerfahrungen mit der Nutzung von VR/AR-Anwendungen aufwiesen. Die Vorstudie lief wie die geplante Hauptstudie ab, um mögliche Probleme zu identifizieren. Auf Änderungen, die daraus hervorgingen, wird ebenfalls im Folgenden eingegangen.



Abbildung 4.13: Virtuelle Testumgebung. *Links:* Virtueller Raum, in dem die Aufgaben durchgeführt werden. *Rechts:* Rückkehrraum mit Hinweisen.

4.3.1 Reale und virtuelle Testumgebung

Für die Studie wurde eine Testumgebung mit Unity 2019¹ erstellt. Der virtuelle Raum, welcher in Abbildung 4.13 (links) zu sehen ist, wurde möglichst nüchtern gestaltet, um nicht von den Aufgaben abzulenken. In dem Raum befanden sich nur vier Lichtquellen, die um die Testperson herum an der Decke verteilt waren, sowie die Objekte der Aufgaben. Auf dem Boden sind mehrere Kreise dargestellt, um Distanzen besser abschätzen zu können und den Mittelpunkt des Raumes kenntlich zu machen. Die Aufgaben wurden stehend durchgeführt und über das physische Gehen hinaus standen keine weiteren Fortbewegungsmöglichkeiten zur Verfügung. Die Testpersonen sollten sich außerdem möglichst wenig bewegen, da hierdurch die Perspektive sowie die Distanz zu den Aufgabenobjekten verändert werden könnten, was wiederum die Ergebnisse beeinflussen hätte können. Aus diesem Grund wurde, angelehnt an einem in der Studie von Moore et al. (2018) verwendeten Mechanismus, ein runder Aktionsraum von 1,5 m Durchmesser im Zentrum des virtuellen Raumes definiert. Sobald der Kopf der Testperson diesen verließ, wurden der eigentliche Raum sowie alle Aufgabenobjekte ausgeblendet und über textuelle Hinweise wurde dazu aufgefordert, zum Aktionsraum zurückzukehren (siehe Abbildung 4.13 (rechts)). Dabei wird der Aktionsraum als Zylinder dargestellt. In der Realität wurde ein Bereich von 2 x 3 m abgemessen, wobei die Testperson beim Durchführen der Aufgabe im Zentrum dieses Bereiches stand. Die Anwendung wurde so umgesetzt, dass der Studienleiter beim Start auswählen konnte, ob die Testperson Links- oder Rechtshänder/in ist und die Belegung der Controller, sowie visuelle Aspekte der Technik, wenn nötig entsprechend angepasst wurden. Für die Evaluation wurden ein Alienware 17 R4 (Intel i7-7700HQ, NVIDIA GTX 1070, 16 GB Ram) und eine HTC Vive Pro verwendet.

4.3.2 Aufgaben

Die Aufgaben wurden so konzipiert, dass diese die Veränderung der unabhängigen Variablen (siehe Kapitel 4.3.3) möglichst gut unterstützen. Auch wurden diese nicht von Grund auf neu konzipiert, sondern bauen auf Aufgaben auf, die in anderen Studien verwendet wurden. So basiert die Aufgabe für die Selektion beispielsweise auf Arbeiten von Baloup

¹<https://unity.com>, letzter Abruf 21.02.2021

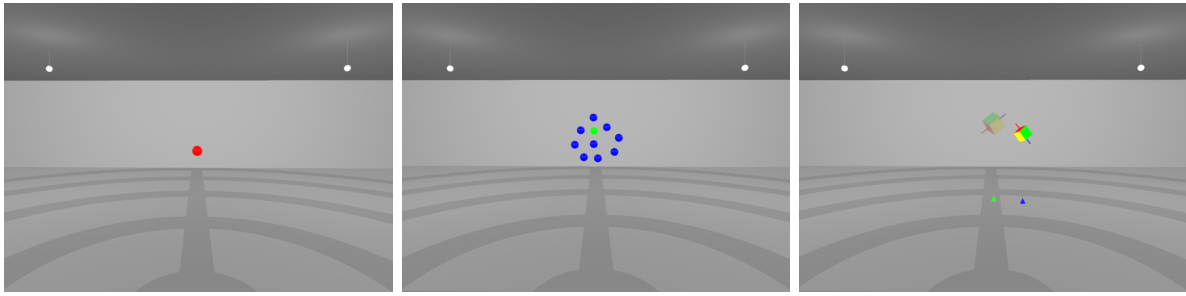


Abbildung 4.14: Aufgaben. *Links:* Initiale Kugel zum Starten der Selektionsaufgabe *Mitte:* Anordnung mehrerer Kugeln mit grüner Zielkugel. *Rechts:* Manipulationsaufgabe mit Startobjekt und transparentem Zielobjekt.

et al. (2019) und Moore et al. (2018). Das Ziel ist es hier, eine Kugel auszuwählen. Eine Beispielaufgabe ist in Abbildung 4.14 (links und Mitte) zu sehen. Initial muss eine rote Kugel selektiert werden, woraufhin ein Aufbau von einer oder mehrerer Kugeln erscheint, wobei das Ziel grün gefärbt ist. Unabhängig von der verwendeten Interaktionstechnik wurde die vom Selektionswerkzeug getroffene Kugel mit einer gelben Umrandung hervorgehoben, um die Vergleichbarkeit der Techniken zu erhöhen. Die Selektion der roten Kugel erfordert die Rückkehr zu einer neutralen Position, sodass vorangegangene Aufgaben die Ergebnisse der aktuellen Aufgabe nicht beeinflussen.

Bei der Manipulation bestand die Aufgabe darin, einen Würfel mit sechs unterschiedlich farbigen Flächen so zu positionieren, rotieren und skalieren, dass er möglichst genau in eine transparente Darstellung des Würfels passt. Die Aufgabe ist in Abbildung 4.14 (rechts) dargestellt. Für die Lösung darf die Position maximal 10 cm, die Rotation maximal 20 Grad und die Größe des Würfels maximal 10 cm von den Werten des transparenten Würfels abweichen. Zum Zeitpunkt der Vorstudie waren die möglichen Toleranzen noch geringer und wurden für die Hauptstudie angepasst, da die Aufgabe sonst zu schwer war. In der Vorstudie wurde eine Aufgabe sofort beendet, wenn der Würfel losgelassen wurde und sich dann innerhalb der Toleranzen des transparenten Würfels befand, obwohl die Testpersonen den Würfel in einigen Fällen noch genauer platzieren wollten. Aus diesem Grund wurde sich im Rahmen der eigentlichen Studie dafür entschieden, die Lösung erst dann zu akzeptieren, wenn der Grip-Button des Controllers (siehe Abbildung 4.2) gedrückt wurde. Wurde versucht, die Aufgabe zu lösen, obwohl der Würfel noch nicht innerhalb der Toleranzen lag, passierte nichts. Der Würfel wurde nach der Vorstudie außerdem um zwei Stangen auf gegenüberliegenden Seiten erweitert, um zusätzliche räumliche Indikatoren zu bieten. Außerdem wurden zentral unter den Objekten verschiedenfarbige Kegel hinzugefügt, die dabei helfen sollten, die Distanz der Objekte besser abschätzen zu können. In der Vorstudie ist einmalig der Fall eingetreten, dass ein Objekt von der Testperson aus Versehen aus dem Raum geschoben wurde, da in der Anwendung kein Kollisionsverhalten simuliert wird. Daraufhin wurde ein Mechanismus implementiert, der das Objekt zum nächstmöglichen Punkt im Raum zurückversetzt, sobald die Testperson das Objekt außerhalb des Raumes loslässt. Dieser Fall trat in der eigentlichen Studie allerdings nicht auf.

Manipulationsgrad	Manipulationsart	Positionierung	Rotation	Skalierung
Gering	Achsen	x	x	x/y/z
	Ausmaß	1/3 m	45-90°	Faktor 1,25-1,5
Mittel	Achsen	x/y	x/y	x/y/z
	Ausmaß	2/3 m	90-135°	Faktor 1,5-1,75
Hoch	Achsen	x/y/z	x/y/z	x/y/z
	Ausmaß	1 m	135-180°	Faktor 1,75-2

Tabelle 4.1: Auswirkungen des Manipulationsgrades auf die einzelnen Manipulationsaufgaben hinsichtlich der Achsen und des Ausmaßes der nötigen Manipulation.

4.3.3 Design

Bowman und Hodges (1999) definieren vier Kategorien von Faktoren, die Einfluss auf die Performance einer Interaktionstechnik haben. Dies sind Aufgaben- (z.B. Anzahl der Achsen, auf denen ein Objekt verschoben werden muss), Umgebungs- (z.B. Objektdichte), Nutzer- (z.B. Armlänge) und Systemcharakteristiken (z.B. Latenz der Eingabegeräte). Nutzercharakteristiken sind schwer zu variieren, da sie von den teilnehmenden Testpersonen abhängig sind. Wie eingangs erwähnt, sollen die Interaktionstechniken in dieser Studie außerdem unabhängig von unterschiedlichen Ein- und Ausgabegeräten untersucht werden, weshalb auch Systemcharakteristiken hier nicht betrachtet werden. Aus diesem Grund standen für die Studie Aufgaben- und Umgebungscharakteristiken im Fokus. Für die Auswahl der unabhängigen Variablen für die Studie wurden sowohl typische Aufgabenparameter nach LaViola et al. (2017) als auch die meistgenutzten Variablen aus den Studien der vorangegangenen systematischen Literaturanalyse (Weise & Zender, 2019) mit einbezogen. Die gewählten unabhängigen Variablen bilden somit relevante Einflussfaktoren bei der Interaktion im dreidimensionalen Raum ab, auf die auch bereits im Kapitel 2.2.4 eingegangen wurde. Für die Bestimmung der möglichen Werte, die die Variablen annehmen können, wurde sich an einigen der betrachteten Studien orientiert (siehe z.B. Bowman et al. (1999); Moore et al. (2018); Qian und Teather (2017)). Leider wird in kaum einer Arbeit eine Begründung für die gewählten Ausprägungen gegeben. Durch eigene Tests wurde allerdings versucht, die möglichen Werte so anzupassen, dass sie sich auf die Performance der Techniken auswirken, das Zeitlimit von 30 Sekunden aber möglichst nicht überschritten wird. Durch die Vorstudie wurde dies verifiziert.

Für die Selektionsaufgabe wurden die unabhängigen Variablen Distanz (0,6 m, 3 m und 6 m), Objektgröße (15 cm, 10 cm und 5 cm) und Objektdichte (einzeln, 10 oder 5 cm zwischen den Objekten) gewählt. Bei der Manipulationsaufgabe setzen sich diese aus Distanz (0,6 m, 3 m und 6 m), Aufgabentyp (Positionierung, Rotation, Skalierung, Positionierung + Rotation oder Positionierung + Rotation + Skalierung) und Manipulationsgrad (gering, mittel oder hoch) zusammen. Der Manipulationsgrad beeinflusst die Achsen, auf denen das Objekt bewegt werden muss, und das Ausmaß der durchzuführenden Manipulation. Tabelle 4.1 schlüsselt die Auswirkungen des Manipulationsgrades auf die einzelnen Aufgabentypen auf. Besteht die Aufgabe z.B. darin, ein Objekt bei hohem Manipulationsgrad zu positionieren, rotieren und skalieren, muss es um 1 m verschoben, zwischen 135° und 180° gedreht und um den Faktor 1,75 bis 2 vergrößert oder verkleinert werden. Da der Manipulationsgrad hoch ist, findet die Manipulation für jeden Aufgabentyp auf allen Achsen statt. Da keine der Techniken die asymmetrische Skalierung erlaubt, erfolgt

die Vergrößerung oder Verkleinerung von Objekten immer auf allen Achsen. Auch die Interaktionstechniken stellen unabhängige Variablen dar, die aber im Kapitel 4.2 bereits dediziert betrachtet wurden.

Um die Performance der Techniken in den Szenarien erfassen zu können, müssen objektive Messungen durchgeführt werden, die Rückschlüsse auf die Leistung der Testpersonen bei der Durchführung der einzelnen Aufgaben zulassen. Auch hier wurden wieder die meistgenutzten Messkriterien aus der vorangegangenen systematischen Literaturanalyse (Weise & Zender, 2019) sowie gängige objektive Messkriterien nach Poupyrev et al. (1997) herangezogen. Für beide Aufgabentypen ergaben sich somit die beiden unabhängigen Variablen Geschwindigkeit und Präzision. Die Geschwindigkeit wird durch die benötigte Zeit zum Durchführen der Aufgabe bestimmt. Bei der Selektionsaufgabe startet die Zeitmessung, sobald die rote Kugel ausgewählt wird und endet durch die Auswahl des Zielobjekts. Bei der Manipulationsaufgabe wird die Zeit erfasst, sobald das Zielobjekt das erste Mal ausgewählt wird und endet, sobald die Lösung durch die Testperson bestätigt wird. Die Präzision ergibt sich bei der Selektion aus der Anzahl der Misserfolge, d.h. wie oft das falsche oder kein Objekt ausgewählt wurde, bis das richtige Objekt selektiert wurde. Bei der Manipulation wird für die Erfassung der erreichten Präzision die Differenz zum Zielobjekt für die Position, die Rotation und der Größe des Objekts einzeln erfasst, nachdem die Testperson die Lösung bestätigt hat.

Neben den objektiv erfassten Kriterien spielen auch die subjektiven Einschätzungen der Testpersonen eine wichtige Rolle. Hierüber können Rückschlüsse auf die Usability und die erreichte User Experience über einzelne Anwendungsszenarien hinweg gezogen werden. Zur Ermittlung der Usability wurde der System Usability Scale (Brooke, 1996) verwendet. Darüber hinaus wurden eigene Fragen gestellt, die die zusätzlichen Faktoren Natürlichkeit, Spaß, Präzision, Geschwindigkeit und Motion Sickness erfassen. Die subjektive Natürlichkeit wurde erfragt, um diese mit der Dimension *Interaction Fidelity* aus der Taxonomie (siehe Kapitel 3.2.12) zu vergleichen. Der gefühlte Spaß sowie die subjektiven Einschätzungen zur Präzision und Geschwindigkeit wurden erfasst, da diese auch oft in anderen Studien erfasst werden, um Rückschlüsse auf die User Experience ziehen zu können, wofür sie auch in dieser Studie genutzt werden sollen. Die eigenen Fragen sind nicht validiert und zur Erfassung der User Experience Aspekte hätte auch ein standardisierter Fragebogen Verwendung finden können, wie der User Experience Questionnaire (UEQ) (Laugwitz et al., 2008). Diese Fragebögen erfordern allerdings die Beantwortung einer Vielzahl von Items, was entsprechend mehr Zeit in Anspruch genommen hätte. Da die Fragebögen bis zu fünfmal ausgefüllt werden mussten, hätte dies den Studienablauf entsprechend verzögert. Des Weiteren war es durch die eigenen Fragen möglich, gezielter auf die gewünschten Aspekte einzugehen. Die erfahrene Motion Sickness wurde nur erfasst, um hierauf zurückführbare Probleme auszuschließen. Da sich die Testpersonen kaum bewegt haben, wurde keine hohe Motion Sickness erwartet, weshalb auf einen größeren standardisierten Fragebogen verzichtet wurde.

Da die Techniken auf Körperbewegungen basieren und einige mehr oder weniger komplex und anstrengend sind, stellt auch der mentale und physische Aufwand ein wichtiges Vergleichskriterium dar. Um dies zu erfassen, wurde der NASA Task Load Index (TLX) (Hart & Staveland, 1988) in einer deutschen Übersetzung (Vejvoda et al., 2000) verwendet. Im ursprünglichen Fragebogen werden die Testpersonen nach der Beantwortung des Fragebogens gebeten, die sechs Skalen paarweise nach der empfundenen Wichtigkeit zu

vergleichen. Hieraus werden dann Gewichtungen für die einzelnen Skalen bestimmt, die mit den Antworten verrechnet werden. In vielen Studien wird dieser Schritt übersprungen, was auch als Raw TLX bezeichnet wird und in der Regel zu ähnlichen Resultaten führt (Hart, 2006). Da die Gewichtung der Skalen zusätzliche Zeit bei der Durchführung der Studie in Anspruch nehmen würde, wurde sich dafür entschieden, den Raw TLX zu verwenden. Über ein Kommentarfeld konnten die Testpersonen zusätzliche Anmerkungen machen.

Nachdem alle Techniken von einer Testperson getestet wurden, wurde sie außerdem gebeten, die Techniken nach eigenen Präferenzen zu sortieren. Wichtig hierbei ist, dass die Testpersonen nicht immer zwangsläufig Techniken hatten, die die gleichen Aufgaben erfüllen konnten. Bei der Bewertung der Techniken kam es also darauf an, eigenständig verschiedene Faktoren wie Usability und Ausdrucksstärke der Techniken abzuwägen.

Unabhängig vom Aufgabentyp hatten die Testpersonen 30 Sekunden Zeit, um die Aufgabe erfolgreich abzuschließen. War dies nicht möglich, zählte dies als Fehlversuch, der aktuelle Aufgabenaufbau verschwand und die nächste Aufgabe wurde angezeigt. Wurde eine Aufgabe richtig gelöst, wurde eine kleine Animation mit Sternen ausgelöst, untermauert von einem akustischen Signal, und die nächste Aufgabe wurde eingeblendet. Dies geschah innerhalb von einer Sekunde. Bei beiden Aufgabentypen wurden die Objekte relativ zur Position des Kopfes erstellt, sodass jede Testperson die Objekte aus der gleichen Perspektive betrachten konnte.

Aufgrund der vielen Techniken, die miteinander verglichen werden sollten, war kein Within-Subject Design möglich, d.h. nicht jede Technik wurde von jeder Testperson getestet. Auch ein Between-Subject Design war nicht möglich, da hier eine sehr viel höhere Anzahl an Testpersonen nötig gewesen wäre. Aus diesen Gründen wurde ein Mixed Design gewählt. Da die Aufgaben bei der Selektion schneller durchgeführt werden konnten, wurden hier fünf Techniken pro Testperson getestet und bei der Manipulation drei Techniken pro Testperson. Die Techniken wurden zufällig zugewiesen, aber gleichmäßig verteilt. Ebenso wurden Testpersonen zufällig den jeweiligen Teilstudien zugewiesen.

Für jede Kombination aus unabhängigen Variablen (ohne Techniken) wurden für die Manipulation zuvor zwei und für die Selektion drei Aufgaben zufällig generiert. Dies geschah mit einem Dialog, der im Rahmen der Entwicklung der für diese Studie verwendeten Testumgebung umgesetzt wurde (siehe Kapitel 5.2). Insgesamt wurden somit 81 Aufgaben für die Selektion und 90 Aufgaben für die Manipulation generiert. Die Anzahl der Aufgaben wurde auf Basis der Erfahrungen aus der Vorstudie gewählt, sodass pro Testperson maximal 60 Minuten benötigt wird. Die Aufgaben werden zufällig durchlaufen, wobei einige Einschränkungen zu beachten sind, da nicht jede Technik jede Aufgabe unterstützt. Einige Techniken ermöglichen nur die Interaktion auf kurze Distanz oder unterstützen die Skalierung von Objekten nicht (siehe Kapitel 4.2). Aus diesem Grund wurden Dummy-Aufgaben generiert, die Aufgaben ersetzen, die von den Techniken nicht unterstützt werden. Diese Aufgaben waren für die Testpersonen nicht von den eigentlichen Aufgaben unterscheidbar. Sie wurden ebenfalls zufällig generiert, erforderten aber beispielsweise nicht die Skalierung, wenn dies nicht von der Technik unterstützt wurde. Die Geschwindigkeit und Präzision beim Lösen dieser Aufgabe wurden nicht erfasst. Darüber hinaus kommen die Dummy-Aufgaben immer am Ende, um für die unterstützten Aufgaben eine bessere Vergleichbarkeit zu ermöglichen, da dann die Dummy-Aufgaben nicht als Training fungie-

ren. Somit kommen bei der Selektion und Manipulation Aufgaben auf kurze Distanzen bei jeder Technik zuerst, während bei der Manipulation zusätzlich zuerst Aufgaben kommen, die die Positionierung und Rotation ermöglichen.

4.3.4 Kompromiss zwischen Geschwindigkeit und Präzision

Ein bekanntes Problem bei Studien, ähnlich zu der hier vorgestellten, ist der Kompromiss zwischen Geschwindigkeit und Genauigkeit. Für die Testpersonen ist es schwer, bei der Durchführung der Aufgaben sowohl Geschwindigkeit als auch Genauigkeit zu optimieren, was auch als *Speed-Accuracy Tradeoff* bezeichnet wird (siehe Kapitel 2.1.4). Um diesem Problem zu begegnen, wurde in dieser Studie ein ähnlicher Ansatz wie von Wingrave und Bowman (2005) gewählt. Für jede Aufgabe erhielten die Testpersonen am Ende zwei Punktwerte, einen für die erreichte Geschwindigkeit und einen für die erreichte Genauigkeit. Diese Punktzahl wurde in Abhängigkeit zur Leistung der anderen Teilnehmenden bestimmt. Bei der Selektion bekam die Testperson mit der höchsten Geschwindigkeit bzw. größten Präzision somit 10 Punkte und bei der Manipulation 12 Punkte. Die nächstbesten Teilnehmenden bekamen entsprechend immer einen Punkt weniger. Die Punktzahlen wurden zusammengerechnet und so eine Rangliste für jede Technik bestimmt. Der Erstplatzierte erhielt einen Amazon-Gutschein über 10 €. Die Testpersonen wurden über dieses Verfahren informiert und waren so angehalten, sowohl die Geschwindigkeit als auch die Präzision zu optimieren.

4.4 Ablauf der Studie

Für die Studie wurde über Aushänge an der Universität Potsdam geworben. Dabei wurde gefordert, dass die Testpersonen dreidimensional sehen können und keine Farbschwächen haben. Eingangs musste ein Dokument unterschrieben werden, welches über die einzelnen Schritte der Studie sowie über die Datenverarbeitung informierte (siehe Anhang A.3 und A.4). Dieses wurde den Testpersonen zuvor per Mail zugeschickt. Anschließend wurde ein persönlicher Fragebogen ausgefüllt, in dem demographische Daten (Alter, Händigkeit, Geschlecht, Brillenträger/innen und Berufsfeld) und der Erfahrungsstand mit bestimmten Geräten und Eingabemethoden (Computer, Maus, Touchscreen, Körpererkennung, Fingererkennung, Eye-Tracking und 3D Controller), sowie bestimmten Anwendungen (3D Anwendungen, 3D Computerspiele und VR/AR Anwendungen) erfragt wurde. Ein weiteres Dokument, welches von den Testpersonen vor Ort durchgelesen werden musste, beschrieb noch einmal detailliert die durchzuführende Aufgabe und erklärte die nötigen Buttons der Controller (siehe Anhang A.3 und A.4).

Wenn die Testperson keine weiteren Fragen hatte, wurde sie in den abgemessenen Versuchsbereich geführt und ihr wurde das VR-Headset aufgesetzt. Auch wenn eine Technik getestet wurde, die einhändig funktioniert, wurden der Testperson beide Controller gegeben, die auch über den kompletten Verlauf in den Händen gehalten werden mussten. Es folgte eine kurze Einführung in die virtuelle Umgebung, wobei der Aktionsraum beschrieben und der Rückkehrraum demonstriert wurde. Anschließend begann die Trainingsphase der ersten Technik. Hier wurden je nach Komplexität der Technik 1-4 Erklärungstex-

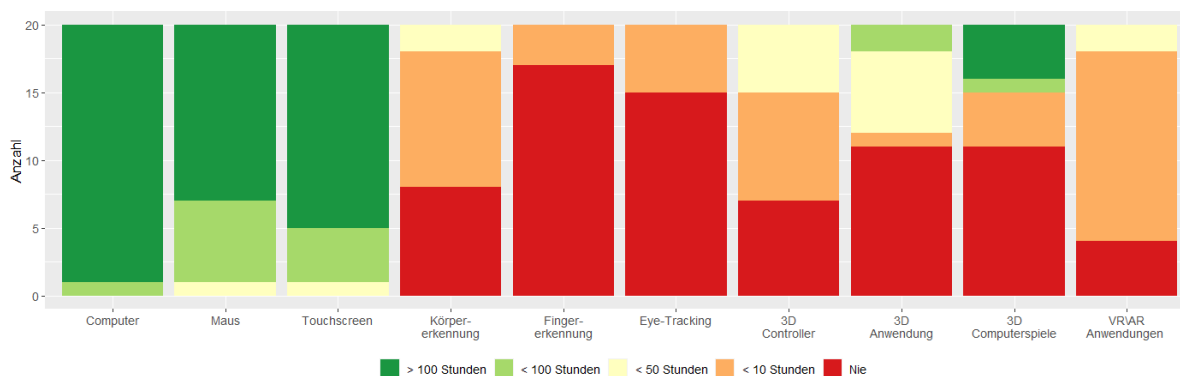


Abbildung 4.15: Ergebnisse des persönlichen Fragebogens aus der Selektionsstudie.

te vorgelesen, die mit Google Text-to-Speech² erstellt wurden. Für die Techniken *Scaled Scrolling Worlds in Miniature + Scale* und *Expand* sind die Erklärungstexte beispielhaft im Anhang A.5 zu finden. Die Geschwindigkeit, in der die Erklärungstexte aufeinander folgten, konnte durch den Studienleiter kontrolliert werden. Die Testpersonen hatten dann fünf Minuten Zeit, um sich mit der Technik in zuvor generierten Beispielaufgaben vertraut zu machen. Diese Beispielaufgaben waren den eigentlichen Aufgaben ähnlich. Die Testpersonen konnten aber auch schon vor Ablauf der Zeit sagen, dass sie mit den Aufgaben beginnen möchten. Daraufhin startete die Aufgabenphase. Die Durchführung der Aufgaben wurde vom Studienleiter beobachtet und Probleme, Auffälligkeiten und das Verhalten und Bemerkungen der Testperson wurden notiert. Den Testpersonen wurde nicht verboten, während der Durchführung der Aufgaben Kommentare zu machen, sie wurden aber angehalten, dies nur zwischen den Aufgaben, wo keine Zeitmessung stattfindet, zu tun. Diese Beobachtungen werden bei der Beschreibung der Ergebnisse (siehe Kapitel 4.5) miteinbezogen.

Sobald alle Aufgaben erfüllt wurden, wurde der Testperson das Headset abgenommen und sie musste an einem PC den System Usability Scale und die dedizierten Fragen beantworten. Die Fragebögen wurden mit Google-Forms umgesetzt. Der NASA Task Load Index wurde in Papierform ausgefüllt, da die 20-stufigen Skalen schwer mit Google-Forms umsetzbar waren und ein fertig formatierter Fragebogen existiert. Alle Fragebögen sind im Anhang A.6 abgebildet. Es wurde gefragt, ob eine Pause nötig ist und anschließend mit der nächsten Technik fortgefahren. Nachdem alle Techniken getestet wurden, wurde der abschließende Fragebogen zum Sortieren der Techniken ausgefüllt.

4.5 Ergebnisse

An der Selektionsstudie haben 20 Personen (10 Frauen, 10 Männer, 18-40 Jahre, 11 Brillenträger/innen, keine Linkshänder/innen) teilgenommen und an der Manipulationsstudie 32 Personen (12 Frauen, 20 Männer, 18-46 Jahre, 8 Brillenträger/innen, 3 Linkshänder/innen). Die Gruppen haben sich nicht überschritten und somit haben insgesamt 52 Personen an der Studie teilgenommen. Da bei der Selektionsstudie jede Testperson 5 Techniken und bei der Manipulationsstudie 3 Techniken nutzte, wurde somit jede der 10

²<https://cloud.google.com/text-to-speech>, letzter Abruf 21.02.2021

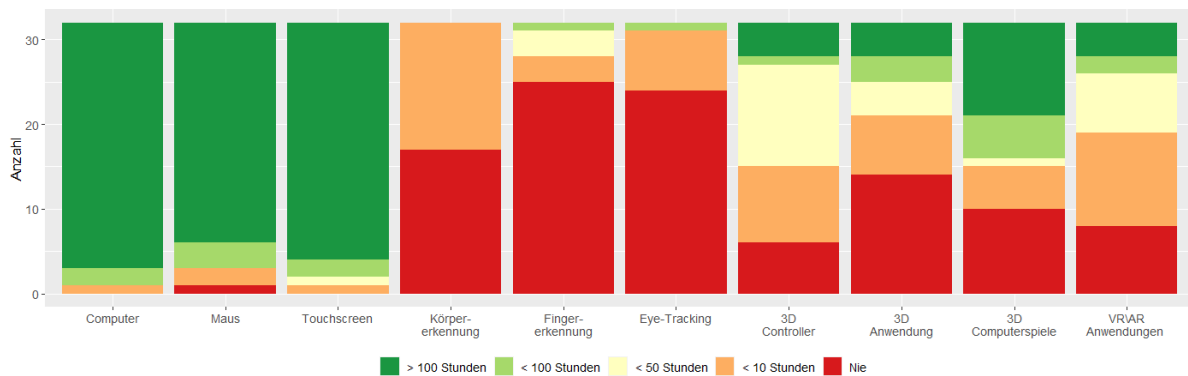


Abbildung 4.16: Ergebnisse des persönlichen Fragebogens aus der Manipulationsstudie.

Selektionstechniken von 10 Testpersonen und jede der 8 Manipulationstechniken von 12 Testpersonen getestet.

Abbildungen 4.15 und 4.16 zeigen die Ergebnisse des persönlichen Fragebogens beider Teilstudien. Gefragt wurde, wie viele Stunden pro Jahr die Testperson die verschiedenen Geräte und Anwendungen in den letzten 3 Jahren verwendet hat. Demnach wies ein Großteil der Testpersonen ein hohes Maß an Erfahrung mit Computer, Maus und Touchscreen auf. Bei den eher weniger verbreiteten Eingabemethoden, die auf Körpererkennung, Fingererkennung oder Eye-Tracking basieren oder 3D Controller nutzen, hatten die meisten Testpersonen dagegen wenig oder gar keine Erfahrung. Bei der Manipulationsstudie gab es allerdings ein paar wenige Testpersonen, die viel Erfahrung mit 3D Controllern und auch mit VR/AR Anwendungen aufwiesen. Ca. die Hälfte der Testpersonen gab hier an, viel oder sehr viel Erfahrung mit 3D Computerspielen zu haben, aber wenige gaben an, viel Erfahrung mit 3D Anwendungen zu besitzen. Bei der Selektionsstudie war der Erfahrungsgrad bei den Anwendungen geringer. Hier gaben nur 5 Personen an, viel oder sehr viel Erfahrung mit 3D Computerspielen zu besitzen.

Die Daten wurden vor allem erhoben, um einen Überblick über die Verteilung der Testpersonen zu erhalten. Dennoch wurde überprüft, ob sich das Alter, die Händigkeit, das Geschlecht oder die Erfahrungen mit bestimmten Eingabegeräten oder Anwendungen auf die gemessenen Zeiten ausgewirkt haben. Die Korrelationskoeffizienten und eine Beschreibung des Verfahrens sind im Anhang A.9.1 zu finden. Nur zwischen dem Geschlecht und den Durchführungszeiten mit der *Scaled HOMER + Scale* Technik in der Manipulationsstudie konnte eine moderate Korrelation festgestellt werden. Zwar sind auch bei den anderen Techniken etwas höhere Korrelationskoeffizienten bzgl. des Geschlechts und der gemessenen Zeiten feststellbar, aber es bleibt immer bei einer schwachen Korrelation. Eine nähere Betrachtung der Daten erlaubt zwar tatsächlich die Vermutung, dass männliche Testpersonen die Aufgaben durchschnittlich schneller durchführten als die weiblichen Testpersonen, Beobachtung und Äußerungen während der Studie lassen aber auch vermuten, dass die männlichen Teilnehmer insgesamt ehrgeiziger waren. Rückschlüsse auf das Geschlecht sollen hier somit nicht gezogen werden. Auch bei den anderen Variablen konnte maximal eine schwache Korrelation zu den gemessenen Zeiten festgestellt werden, und es lassen sich keine Begründungen der vereinzelt höheren Korrelationskoeffizienten finden, weshalb von Zufallseffekten ausgegangen wird. Allgemein gab es teilweise nur sehr wenige oder gar keine Vertreter für die festgelegten Erfahrungsbereiche, weshalb die Korrelationen

nur anhand einer kleinen Datenbasis berechnet werden konnten. Es wurde auch geprüft, ob ein Zusammenhang zwischen den demografischen Angaben und den subjektiv erfassten Kriterien wie Usability oder Workload feststellbar ist. Hier gab es aber nur sehr wenige signifikante Korrelationen, was vermutlich ebenfalls an der kleinen Datenbasis liegt.

Im Folgenden werden die Resultate für die einzelnen Techniken getrennt für die Selektion und die Manipulation beschrieben. Dabei werden die erreichten Zeiten, die Präzision, die Fragebögen und die Sortierung der Techniken durch die Testpersonen für jede Technik einzeln betrachtet. Außerdem werden diese Ergebnisse direkt mit den während der Aufgabendurchführung gemachten Beobachtungen in Bezug gesetzt und erste mögliche Gründe für die beschriebenen Ergebnisse werden angesprochen. Beim NASA Task Load Index wurde die Frage zu den temporalen Anforderungen bei der Auswertung entfernt. Die Testpersonen wurden gebeten, die Fragen des Fragebogens auf die Interaktionstechnik und nicht auf die durchgeführten Aufgaben zu beziehen, was aber insbesondere durch den Wortlaut der Frage zu den temporalen Anforderungen erschwert wurde. Die Fragen, die durch einige Testpersonen gestellt wurden, und die durchgängig hohen Werte, die hier vergeben wurden, lassen darauf schließen, dass die Frage doch vorrangig auf die Aufgaben bezogen wurde, weshalb sie in der Auswertung nicht betrachtet wird. Dies hat Auswirkungen auf den kumulierten Wert zur Arbeitslast, die Techniken bleiben aber untereinander vergleichbar. Das Eliminieren einer Subskala aus dem NASA Task Load Index wurde bereits in anderen Arbeiten durchgeführt, wenn angenommen wurde, dass diese eine geringe Relevanz für die durchzuführende Aufgabe hat (Hart, 2006). Keine Testperson empfand Motion Sickness oder nur in einem geringen Ausmaß, weshalb im Folgenden hierauf nicht eingegangen wird. Die Antworten zur Motion Sickness sind im Anhang A.7 dargestellt.

Um den Zusammenhang zwischen den abhängigen und unabhängigen Variablen zu berechnen, wurde die Korrelation nach Spearman verwendet. Diese eignet sich im Vergleich zur Korrelation nach Pearson auch für ordinale Variablen und kann die Stärke eines monotonen Zusammenhangs messen (Cleff, 2011). Anhand der Diagramme (siehe z.B. A.9) ist ein solch monotoner Zusammenhang in den Daten erkennbar und einige Variablen, wie die Objektdichte in der Selektionsstudie und der Manipulationsgrad in der Manipulationsstudie, sind ordinal skaliert. Der Korrelationskoeffizient wird zwischen -1 und 1 angegeben, je nachdem, ob die Korrelation absteigend oder aufsteigend ist. Ab welchem Wert von einer starken Korrelation auszugehen ist, unterscheidet sich stark je nach Forschungsbereich (Akoglu, 2018). In dieser Arbeit wird eine eher pessimistischere Annahme getroffen, weshalb bei einem Korrelationskoeffizienten ab -0.1 bzw. 0.1 von einer schwachen, ab -0.4 bzw. 0.4 von einer moderaten und ab -0.7 bzw. 0.7 von einer starken Korrelation ausgegangen wird. Zusätzlich werden immer die p -Werte dargestellt, wobei nur bei einem Wert unter 0.05 von einer signifikanten Korrelation ausgegangen werden kann. Grundsätzlich werden die Korrelation immer getrennt für jede Interaktionstechnik berechnet, da anhand Diagrammen und Grafiken der starke Einfluss der Techniken erkennbar ist. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden die p -Werte im Folgenden nicht angegeben, können aber den entsprechenden Tabellen entnommen werden. Korrelationskoeffizienten werden nur angegeben, wenn eine signifikante Korrelation vorliegt.

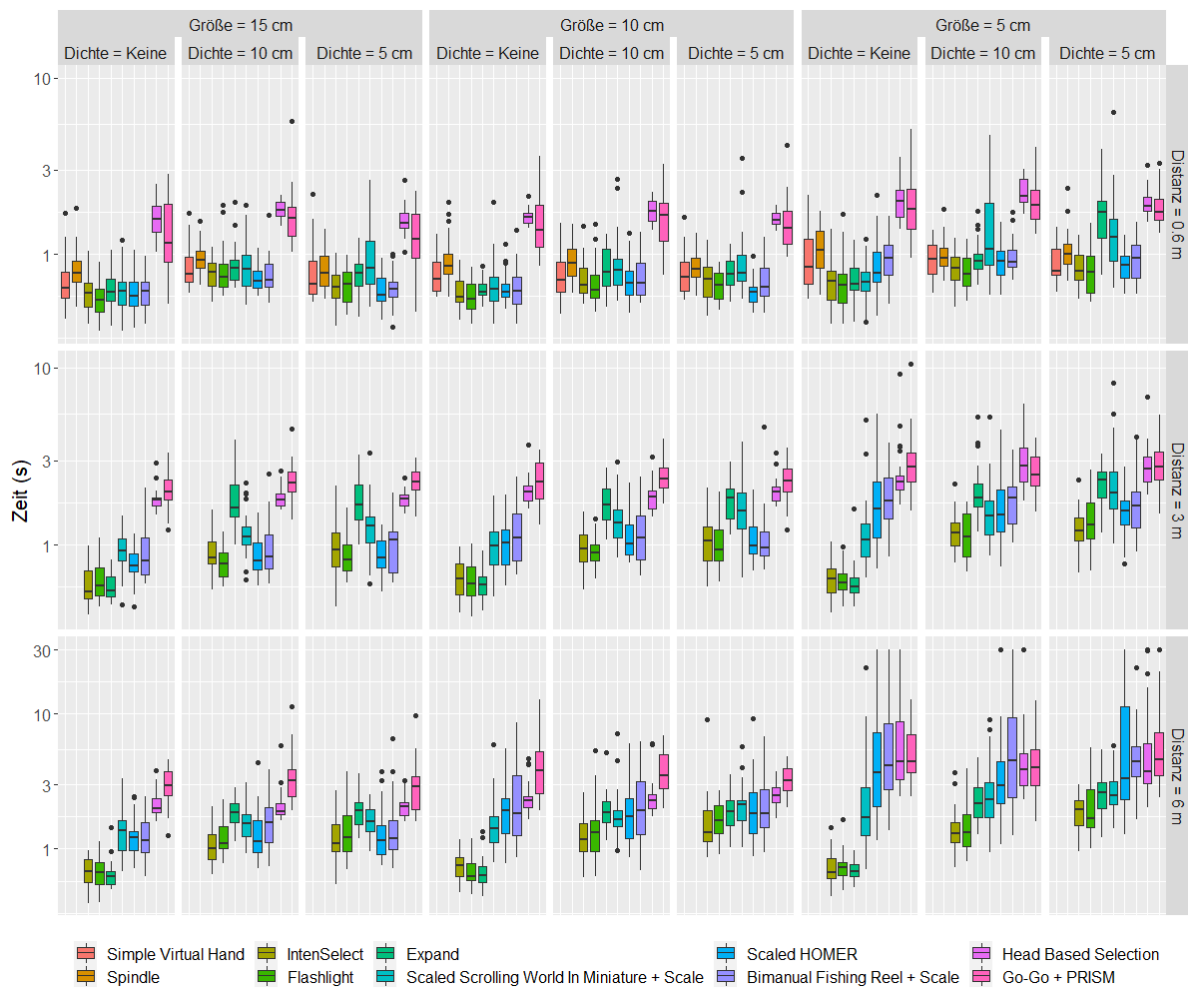


Abbildung 4.17: Standardisiertes Boxplot-Diagramm zu den gemessenen Zeiten in der Selektionsstudie. Die Zeit-Achse ist logarithmisch skaliert.

4.5.1 Selektion

Im Folgenden werden die Resultate der 10 Techniken besprochen, die die Selektion unterstützten und somit in der Teilstudie mit den Selektionsaufgaben getestet wurden. Dabei werden die Techniken hinsichtlich der objektiv erfassten Kriterien Zeit und Präzision und hinsichtlich der Fragebögen getrennt betrachtet.

Zeit und Präzision

Abbildung 4.17 zeigt die erreichten Zeiten der verschiedenen Techniken in den einzelnen Szenarien, die durch Distanz, Objektgröße und Objektdichte bestimmt werden, in Form eines standardisierten Boxplot-Diagramms (Cleff, 2011). Die erreichten Mittelwerte (\bar{x}) der Techniken in den Szenarien und die zugehörigen Standardabweichungen (SD) sind im Anhang A.8.1 aufgeführt und werden in der folgenden Betrachtung vereinzelt hervorgehoben. Für eine bessere Lesbarkeit werden die Mittelwerte und Standardabweichungen für mehrere Szenarien ggf. nach Higgins et al. (2020) zusammengefasst und als \bar{x}_c und SD_c gekennzeichnet. Abbildung 4.18 visualisiert, wie häufig Aufgaben nicht innerhalb des

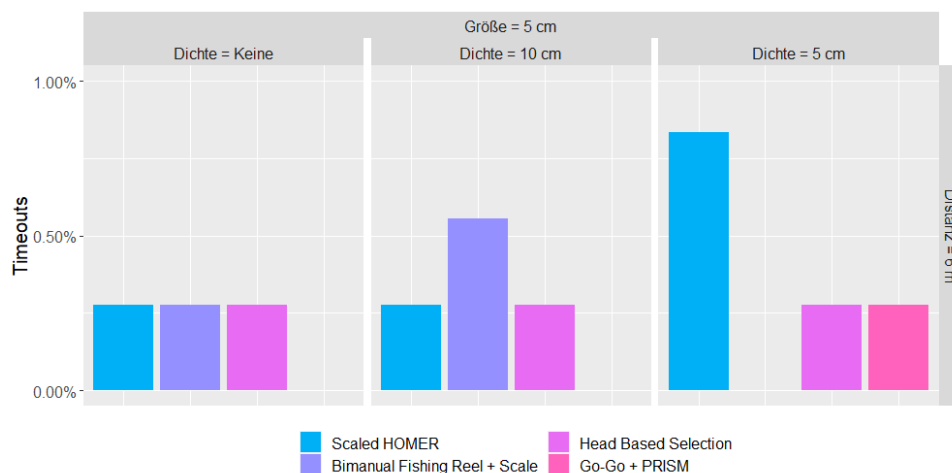


Abbildung 4.18: Häufigkeit von Timeouts in der Selektionsstudie in Prozent.

Zeitfensters von 30 Sekunden erfolgreich abgeschlossen werden konnten. Da dies nur bei einigen wenigen Techniken bei hoher Distanz und kleiner Objektdichte vorkam, sind in der Abbildung nur die Timeouts für die entsprechenden Techniken und Szenarien visualisiert. Abbildung 4.19 zeigt die durchschnittliche Anzahl an fehlerhaften Selektionen pro Aufgabe.

Die Korrelationskoeffizienten (ρ) sind in Tabelle 4.2 abgebildet, wobei für jede Technik überprüft wurde, ob ein Zusammenhang zwischen den Zeiten bzw. der Anzahl der Fehler und der Distanz zum Objekt, der Objektgröße oder der Objektdichte festgestellt werden kann. Da bei der Betrachtung einer unabhängigen Variable allerdings auch die anderen Variablen einen Einfluss haben können, wurde zusätzlich eine detaillierte Berechnung der Korrelation durchgeführt, die im Anhang A.9.2 zu finden ist. Auf diese wird im Folgenden ebenfalls vereinzelt eingegangen. Im Anhang A.9.2 ist außerdem ein Streudiagramm dargestellt, in dem alle Zeitmessungen kategorisiert nach den unabhängigen Variablen visualisiert sind, wodurch eine zusätzliche visuelle Unterstützung für die Erkennung der Korrelation gegeben wird. Im Allgemeinen ist anhand der berechneten Korrelationen erkennbar, dass sich eine steigende Distanz negativ auf die erreichten Zeiten auswirkt, was bei einer Selektionsaufgabe zu erwarten ist. Bei den fehlerhaften Selektionen ist nur in wenigen Fällen mehr als eine schwache Korrelation feststellbar, was vermutlich daran liegt, dass in den meisten Szenarien viele Techniken eher wenige Fehler produzierten. Aus diesem Grund wird im Folgenden nur in Ausnahmefällen auf die Korrelation zwischen den unabhängigen Variablen und den fehlerhaften Selektionen eingegangen.

Simple Virtual Hand *Simple Virtual Hand* konnte nur auf kurze Distanz getestet werden und gehört hier im Mittel zu den schnellsten Techniken ($\bar{x}_c = 0,84$, $SD_c = 0,28$). Hier muss allerdings einschränkend erwähnt werden, dass die durchschnittlich benötigte Zeit für das Durchführen der Aufgaben auf kurzer Distanz mit den meisten Techniken bei unter einer Sekunde lag. Die geringen Unterschiede erschweren somit eine Aussage darüber, welche Technik tatsächlich schneller in diesen Szenarien ist. Eine signifikante Korrelation zwischen Objektgröße und den Zeiten der *Simple Virtual Hand* Technik kann nicht festgestellt werden, was die Beobachtung unterstützt, dass andere Objekte hier kaum störten. Bei der Objektgröße ist nur eine schwache Korrelation erkennbar ($\rho = -0,26$), was

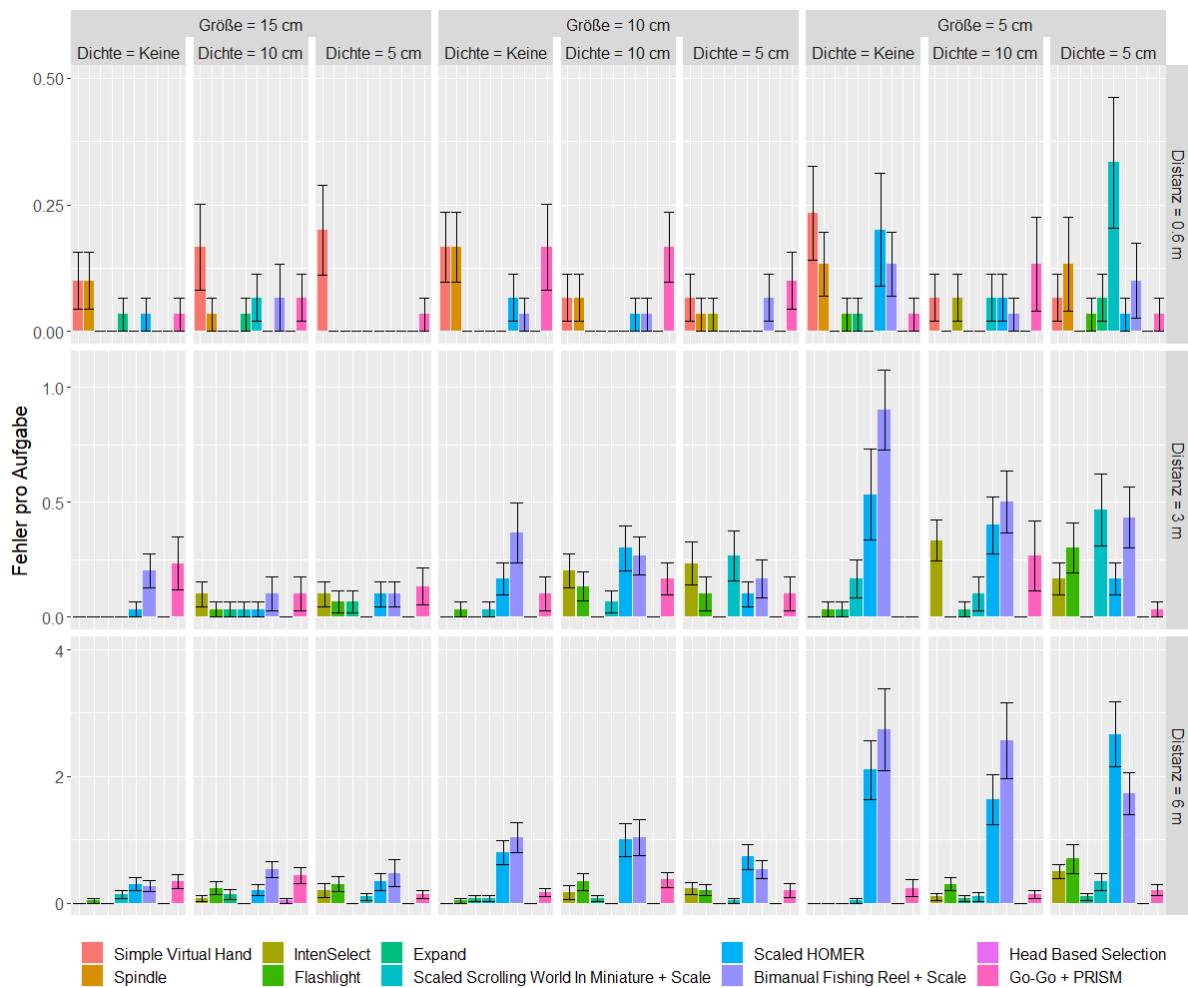


Abbildung 4.19: Fehlerhafte Selektionen in der Selektionsstudie. Die Fehlerbalken geben den Standardfehler an.

vermutlich daran liegt, dass auch kleine Objekte auf nahe Distanz noch eine ausreichende visuelle Größe aufwiesen.

Bei der Technik ist eine geringe, aber dafür durchgängig auftretende Anzahl an fehlerhaften Selektionen erkennbar. Die Daten lassen vermuten, dass hierfür nicht die Objektgröße oder -dichte verantwortlich ist, weil die Fehler in allen Szenarien auftreten. Es konnte beobachtet werden, dass die Testpersonen den virtuellen Cursor anscheinend schnell bewegen konnten, ohne dabei viel überlegen zu müssen. Dabei zogen einige Testpersonen den Controller allerdings bereits beim Selektieren zurück, um schnell zur neutralen Position zurückzukehren und anschließend mit der nächsten Aufgabe fortfahren zu können, ohne auf das Signal zur erfolgreichen Lösung der Aufgabe zu warten. Die Selektion löste bei dieser Technik aber erst aus, wenn der Trigger komplett durchgedrückt wurde. Dieser längere Weg bis zur eigentlichen Auswahl des Objekts führt vermutlich dazu, dass die Selektion in einigen Fällen erst ausgelöst wurde, nachdem der Controller das Objekt bereits wieder verlassen hatte, was entsprechend zu einem Fehler führte. Einige Testpersonen irritierte außerdem, dass die graue Kugel vor dem Controller als Selektionspunkt diente und nicht der komplette Controller. Da die Kugel zuweilen durch den Controller verdeckt war, könnte auch dies zu fehlerhaften Selektionen geführt haben.

Interaktionstechnik	Zeit						Fehler					
	Distanz		Dichte		Größe		Distanz		Dichte		Größe	
	ρ	p	ρ	p	ρ	p	ρ	p	ρ	p	ρ	p
Simple Virtual Hand	-	-	-0,04	0,48	-0,26	0,00	-	-	0,07	0,25	0,03	0,63
Spindle	-	-	0,01	0,82	-0,29	0,00	-	-	0,16	0,01	-0,04	0,53
IntenSelect	0,42	0,00	-0,48	0,00	-0,19	0,00	0,15	0,00	-0,21	0,00	-0,12	0,00
Flashlight	0,45	0,00	-0,49	0,00	-0,18	0,00	0,23	0,00	-0,16	0,00	-0,07	0,05
Expand	0,34	0,00	-0,65	0,00	-0,14	0,00	0,07	0,06	-0,02	0,60	-0,02	0,60
Scaled Scrolling World In Miniature + Scale	0,59	0,00	-0,31	0,00	-0,25	0,00	0,05	0,17	-0,12	0,00	-0,14	0,00
Scaled HOMER	0,71	0,00	-0,03	0,43	-0,40	0,00	0,44	0,00	0,04	0,28	-0,27	0,00
Bimanual Fishing Reel + Scale	0,70	0,00	-0,02	0,55	-0,40	0,00	0,42	0,00	0,09	0,02	-0,24	0,00
Head Based Selection	0,53	0,00	0,00	0,99	-0,49	0,00	0,04	0,22	0,00	1,00	0,04	0,22
Go-Go + PRISM	0,70	0,00	0,02	0,63	-0,23	0,00	0,15	0,00	0,02	0,48	0,07	0,04

Tabelle 4.2: Korrelationen zwischen den einzelnen unabhängigen Variablen Distanz, Dichte und Größe und den abhängigen Variablen Zeit und Anzahl an fehlerhaften Selektionen getrennt für jede Interaktionstechnik aus der Selektionsstudie. Es werden jeweils der Korrelationskoeffizient (ρ) nach Spearman und der p -Wert angegeben. Die Hintergrundfarben visualisieren die Stärke und Richtung (rot=negativ, blau=positiv) der Korrelation. Bei den p -Werten signalisiert eine grüne Hintergrundfarbe, dass eine signifikante Korrelation festgestellt werden konnte ($p < 0,05$). Unterstützt eine Technik eine unabhängige Variable nicht, sind die entsprechenden Zellen grau hinterlegt.

Spindle Die Zeiten von *Spindle* verhalten sich ähnlich zu denen der *Simple Virtual Hand* Technik. Auch *Spindle* konnte nur auf kurze Distanz geprüft werden und erreicht in den meisten Szenarien zwar minimal schlechtere Mittelwerte bei einer ähnlichen Varianz als *Simple Virtual Hand* ($\bar{x}_c = 0,94$, $SD_c = 0,27$), allerdings erschwert es der geringe Unterschied zwischen den einzelnen Techniken, auf kurze Distanz hier erneut konkrete Aussagen zu treffen. Die Auswirkungen der Objektdichte und Objektgröße ($\rho = -0,29$) fallen ähnlich gering wie bei *Simple Virtual Hand* aus, ebenso wie die in fast allen Szenarien auftretende geringe Anzahl an Fehlern. Auch hier zogen viele Teilnehmende die Controller noch während der Selektion zurück, was entsprechend zu Fehlern geführt haben könnte.

IntenSelect *IntenSelect* erreicht im Mittel zusammen mit *Flashlight* in allen Szenarien die schnellsten Zeiten. Zwar ist eine moderate Korrelation ($\rho = 0,42$) zwischen der Distanz und den erreichten Zeiten erkennbar, die fällt allerdings geringer aus als bei den meisten anderen Techniken. Insbesondere bei einzelnen Objekten scheint die Technik eine schnelle Selektion zu erlauben, was vermutlich daran liegt, dass nur ungefähr in die Richtung des Objekts gezeigt werden muss, damit der rote Lichtstrahl sich an das Objekt heftet und man es selektieren kann. In diesen Szenarien haben die Variablen Distanz und Objektgröße kaum Auswirkungen auf die erreichten Zeiten ($-0,25 \leq \rho \leq 0,37$, siehe Anhang A.9.2) und auch fehlerhafte Selektionen treten nicht auf. Auf kurze Distanz bleibt die Technik ähnlich schnell, ohne dass ein stärkerer Einfluss der Objektdichte und der Objektgröße erkennbar ist ($-0,33 \leq \rho \leq -0,22$, siehe Anhang A.9.2). Die allgemeine Korrelation zwischen der Objektdichte und der Zeit erweist sich allerdings als stärker als bei den meisten

anderen Techniken ($\rho = -0,48$). Insbesondere bei geringerer visueller Größe der Objekte (größere Entfernung und kleinere Objektgröße) ist eine Verschlechterung der Zeiten bei sinkender Objektdichte erkennbar. Beobachtungen während der Studie haben gezeigt, dass die Testpersonen in diesen Szenarien kontrollierter arbeiten mussten und der rote Lichtstrahl in wenigen Fällen kurz vor der Selektion doch auf das falsche Objekt gesprungen ist. Dies kann eine Erklärung für die etwas schlechteren Zeiten und die hier regelmäßig, aber in geringer Zahl auftretenden Fehler sein. Trotz dieser Probleme erreicht die Technik im schwierigsten Szenario (größte Entfernung, kleine Objektgröße und hohe Objektdichte) die beste mittlere Zeit ($\bar{x} = 1,92s$, $SD = 0,58s$) bei einer geringen Standardabweichung.

Flashlight *Flashlight* verhält sich bei den gemessenen Zeiten und den fehlerhaften Selektionen sehr ähnlich zu *IntenSelect*. Auch hier werden auf geringe Distanz und bei einzelnen Objekten vergleichbar gute Zeiten erreicht, ohne dass ein stärkerer Einfluss der anderen Variablen erkennbar ist. Fehlerhafte Selektionen treten hier ebenfalls sehr selten auf. Ähnlich wie bei *IntenSelect* muss in diesen Szenarien aufgrund der Verwendung von Disambiguierung nur ungefähr in Richtung des Zielobjekts gezeigt werden, um dieses korrekt auswählen zu können. Die gemessenen Zeiten und die im Mittel etwas höhere Anzahl an Fehlern lassen aber in Szenarien mit Objekten auf größerer Entfernung und mit kleinerer Objektgröße ebenfalls eine etwas schwierigere Selektion von Objekten mit *Flashlight* vermuten. Die Korrelationen zwischen der Distanz ($\rho = 0,45$) bzw. der Objektdichte ($\rho = -0,49$) und den erreichten Zeiten sind entsprechend vergleichbar zu denen von *IntenSelect*.

Expand *Expand* erreicht im Mittel bei einzelnen Objekten und auf kurze Distanz ähnliche Zeiten wie *Flashlight*. Dies ist nachvollziehbar, da sich die Techniken gleich verhalten, wenn es möglich ist, in der ersten Phase nur ein Objekt in den Selektionskegel zu bringen. Auf kurzer Distanz, bei hoher Objektdichte und kleinen Objekten, sowie auf größeren Entfernungen, ist dies allerdings nicht mehr möglich und hier wird im Mittel deutlich mehr Zeit für die Selektion benötigt. Bei größeren Objekten, wo die anderen Techniken meist noch gute Zeiten erreichen, gehört *Expand* im Mittel zu den langsamsten Techniken. Dies liegt vermutlich an der zweistufigen Disambiguierung, die entsprechend mehr Zeit benötigt als eine einfache Selektion. Dafür erreicht *Expand* über die Szenarien hinweg durchgängig ähnliche Zeiten, wodurch die Technik im Mittel auch in schwierigen Szenarien bessere Zeiten als die meisten anderen Techniken erreicht. Dies spiegelt sich auch in den geringen Einflüssen der Distanz ($\rho = 0,34$) und der Objektdichte ($\rho = -0,14$) auf die Zeiten wieder. Der angesprochene Anstieg der Zeiten, sobald das Zielobjekt nicht mehr in der ersten Phase selektiert werden kann, führte allerdings zu der stärksten Korrelation zwischen Objektdichte und den gemessenen Zeiten ($\rho = -0,65$) unter allen Techniken.

Die wenigen Ausreißer lassen sich vermutlich auf die verschiedenen Auswahlstrategien der Testpersonen zurückführen. Am schnellsten erschien es in der ersten Phase grob in Richtung des Zielobjekts zu zeigen, auch wenn hierbei möglicherweise viele Objekte in den Selektionskegel fielen. Einige Testpersonen versuchten allerdings, möglichst wenige Objekte in die zweite Phase zu holen, um dort weniger Auswahl zu haben. Bei dieser Strategie wurde oft versucht, das Zielobjekt an den Rand des Kegels zu bringen und möglichst wenig weitere Objekte einzuschließen. Dies führte in einigen Fällen dazu, dass das Zielobjekt beim Drücken des Triggers doch aus den Selektionskegel fiel und das Raster

wieder aufgelöst und die Objekte erneut ausgewählt werden mussten. Alles in allem kostete dies zusätzliche Zeit und führte zu den wenigen fehlerhaften Selektionen bei dieser Technik.

Scaled Scrolling World In Miniature + Scale *Scaled Scrolling World In Miniature + Scale* befindet sich bei der durchschnittlich benötigten Zeit meist im Mittelfeld. Die erfassten Zeiten lassen auf höheren Distanzen allerdings eine langsamere Selektion vermuten ($\rho = 0,59$), was unerwartet ist, da unterschiedliche Entfernungen durch die Verwendung eines Miniaturmodells keine große Rolle spielen sollten. Hier könnte der Aufbau der Studie von Bedeutung sein. Die initiale Kugel, die ausgewählt werden musste, um die Aufgabe zu starten, befand sich immer eine Armlänge vor der Testperson und somit auch weiter im Zentrum des Miniaturmodells. Für die Aufgaben auf kurze Distanz, die alle zuerst kamen (siehe Kapitel 4.3.3), war es so möglich, eine komfortable Skalierungsstufe des Miniaturmodells zu wählen, sodass die Objekte gut ausgewählt werden konnten. Auf große Distanz musste das Miniaturmodell allerdings verkleinert werden, damit sowohl die initiale Kugel als auch die Aufgabenobjekte gut erreichbar sind, wodurch die Objekte kleiner und schlechter selektierbar werden. Eine andere Möglichkeit war es, das Miniaturmodell nach der Selektion der initialen Kugel passend zu skalieren. Bei beiden Lösungswegen konnte ein entsprechender Zeitverlust festgestellt werden. Dieses Verhalten könnte auch die etwas höhere Anzahl an fehlerhaften Selektionen bei kleinen Objekten mit einer hohen Objektdichte erklären. Hier war zu beobachten, dass die Selektionskugel vorne am Controller bei einer kleinen Skalierungsstufe potenziell mehrere Objekte berührte und somit die Wahrscheinlichkeit für eine falsche Selektion höher war. In den anderen Szenarien war die Anzahl fehlerhafter Selektionen sehr gering.

Der Einfluss der Variablen Objektdichte ($\rho = -0,31$) und Objektgröße ($\rho = -0,25$) auf die Zeiten ist eher gering, wobei bei kleinen Objekten einige Ausreißer erkennbar sind. Es war zu beobachten, dass die Testpersonen versuchten, das Miniaturmodell so wenig wie möglich zu skalieren, wodurch entsprechende Aufgaben durch die Verkleinerung im Miniaturmodell schwieriger wurden. Einzelne kleine Objekte waren in einigen Fällen durch die Verkleinerung des Miniaturmodells so klein, dass sie kaum noch erkennbar waren, was ein Grund für die hohe Varianz unter den Teilnehmenden sein kann. Es konnte außerdem beobachtet werden, dass die Testpersonen unterschiedlich gut mit der Skalierung des Miniaturmodells klarkamen, was ebenfalls ein Grund für die hohen Varianzen sein kann.

Scaled HOMER *Scaled HOMER* gehört auf kurze Distanz im Mittel zu den schnellsten Techniken ($\bar{x}_c = 0,74, SD_c = 0,22$), wobei hier, wie bereits angesprochen, schwer Unterschiede zwischen den Techniken auszumachen sind. Auch die Anzahl der fehlerhaften Selektion ist auf kurzer Distanz noch sehr gering. Ab mittlerer Distanz mit einzelnen Objekten setzen sich die Techniken, die Disambiguierung nutzen, merklich ab. Der Einfluss der visuellen Größe der Objekte ist gut an der starken Korrelation zwischen der Distanz und den gemessenen Zeiten ($\rho = 0,71$), sowie an der moderaten Korrelation zwischen der Objektgröße und den gemessenen Zeiten ($\rho = -0,4$) erkennbar. Auf mittlerer Distanz ist *Scaled HOMER* im Mittel noch schneller als die meisten Techniken, aber auch hier werden bei kleineren Objekten schon schlechtere Zeiten im Vergleich zu Techniken mit Disambiguierung erreicht und auch eine höhere Anzahl an Fehlern ist erkennbar. Auf größter Entfernung verstärkt sich dieser Effekt und bei kleinen Objekten ist *Scaled HOMER* hier im Mittel eine der langsamsten Techniken ($\bar{x}_c = 3,35, SD_c = 5,05$), was

sogar zu einigen wenigen Timeouts und zu einer hohen Anzahl an fehlerhaften Selektionen ($\bar{x}_c = 1,08$, $SD_c = 1,82$) führt, was wiederum in eine moderate Korrelation zwischen der Distanz und den erfassten Fehlern resultiert ($\rho = 0,44$). Die Technik erreicht bei der größten Distanz, der kleinsten Objektgröße und der höchsten Objektdichte den schlechtesten Mittelwert ($\bar{x} = 8,38s$, $SD = 9,16s$) und die höchste Standardabweichung unter allen Techniken und Szenarien. Dies verdeutlicht die problematische Selektion in schwierigen Szenarien. Es war zu beobachten, dass es für einige Testpersonen schwieriger war, die Hand ruhig zu halten und so die erforderliche Präzision für eine schnelle Selektion zu erreichen. Es wurde außerdem öfter angemerkt, dass es sehr problematisch sei, kleine und entfernte Objekte zu selektieren. Ein weiteres Problem war, dass die Auflösung der Brille schwer die Überschneidung des Lichtstrahls mit dem Zielobjekt erkennen ließ und der weiße Lichtstrahl sich zusätzlich zu wenig vom grauen Hintergrund abgesetzt hat.

Bimanual Fishing Reel + Scale *Bimanual Fishing Reel + Scale* unterscheidet sich zu *Scaled HOMER* nur durch den Lichtstrahl, der am Ende ausläuft, also nicht ganz durchgängig ist, wenn er auf ein Objekt zeigt. *Bimanual Fishing Reel + Scale* verhält sich entsprechend sehr ähnlich zu *Scaled HOMER* und ist in den meisten Szenarien im Mittel geringfügig langsamer; die hohe Varianz in den Zeiten lässt aber schwer Rückschlüsse darüber zu, ob die Darstellung des Lichtstrahls tatsächlich Einfluss hatte. Auch die Korrelationen der Distanz ($\rho = 0,70$) und Objektgröße ($\rho = 0,40$) bzgl. der gemessenen Zeiten sowie die Korrelation zwischen der Distanz und den fehlerhaften Selektionen ($\rho = 0,42$) verhalten sich ähnlich wie bei *Scaled HOMER*. Zudem gaben die Testpersonen ähnlich häufig an, Probleme mit kleinen entfernten Objekten zu haben und auch die Anzahl der fehlerhaften Selektionen verhält sich sehr ähnlich.

Head-based Selection Die durchschnittlichen mit *Head-based Selection* erreichten Zeiten zählen durchgängig zu den langsamsten Techniken, was vor allem daran liegt, dass der Cursor für eine Sekunde auf dem Objekt gehalten werden musste, damit es selektiert wird. Die Objektdichte scheint keinen Einfluss auf die benötigte Zeit zu haben, was auch an der fehlenden signifikanten Korrelation erkennbar ist. Dies ist nachvollziehbar, da auch bei höchster Objektdichte genügend Platz zwischen den Objekten war, um nicht versehentlich das falsche Objekt auszuwählen. Auch die Distanz zum Objekt wird erst zusammen mit der Objektgröße relevant, d.h. die Daten lassen vermuten, dass mehr Zeit für die Selektion von Objekten mit einer kleineren visuellen Größe benötigt wird. Entsprechend korrelieren die Distanz ($\rho = 0,53$) und Objektgröße ($\rho = -0,49$) moderat mit den gemessenen Zeiten. Es war zu beobachten, dass es in diesen Szenarien für einige Testpersonen schwer war, den Cursor eine Sekunde lang auf ein Objekt zu halten und sie wünschten sich eine kürzere Selektionszeit. Sobald der Cursor das Objekt verließ, wurde die Zeit zurückgesetzt und es musste erneut versucht werden, das Objekt eine Sekunde lang im Fokus zu halten. Dies führte zu einigen Timeouts bei hoher Distanz, kleiner Objektgröße und hoher Dichte. In den anderen Szenarien blieben die Zeiten im Mittel relativ konstant.

Aufgrund der nötigen Verweilzeit mit dem Cursor war es nahezu unmöglich, das falsche Objekt zu selektieren. Daher ist *Head-based Selection* die Technik mit der geringsten Anzahl an fehlerhaften Selektionen. Nur einmal wurde das falsche Objekt ausgewählt, was sich auf Basis der Beobachtungen auf eine Unachtsamkeit der Testperson zurückführen lässt.

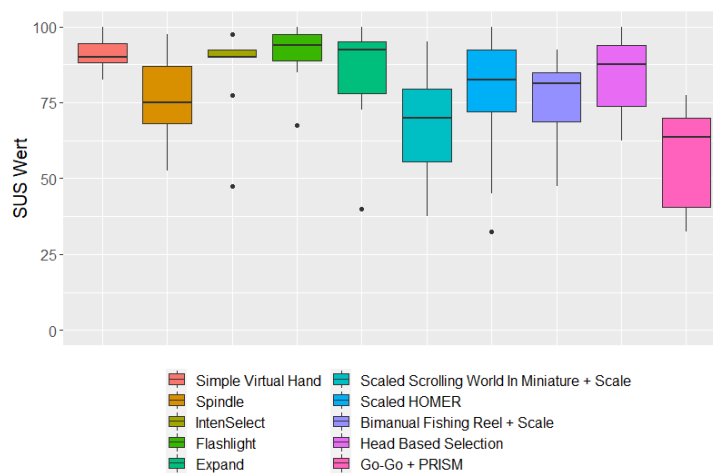


Abbildung 4.20: Ergebnisse des System Usability Scales aus der Selektionsstudie.

Go-Go + PRISM Die mit *Go-Go + PRISM* im Durchschnitt erreichten Zeiten gehören durchgängig zu den schlechtesten. Die Objektdichte hatte kaum Einfluss auf die Zeiten, da auch hier vermutlich stets genügend Platz war, um mit dem Cursor zwischen den Objekten zu agieren. Die Objektgröße scheint sich nur geringfügig auf die Zeiten auszuwirken ($\rho = -0,23$). Bei der Distanz ist dagegen eine starke Korrelation festzustellen ($\rho = 0,7$). Im schwierigsten Szenario (kleine Objekte, hohe Distanz und hohe Objektdichte) konnten so auch einige wenige Timeouts verzeichnet werden.

Die bei der Technik verwendete Abbildung von den Bewegungen des Controllers auf den virtuellen Cursor hatte vermutlich starke Auswirkungen auf die Interaktion mit den Objekten. Es war zu beobachten, dass die Testpersonen Probleme mit der Steuerung des Cursors hatten und häufig ein unvorhersehbares Verhalten der Technik anmerkten. Dadurch wurde die Selektion von Objekten schon auf kurze Distanz beeinflusst, weil die Kugeln kurz hinter der Grenze lagen, bis wohin die Abbildungsfunktion noch isomorph war. Dies führt dazu, dass der Cursor oft zu weit nach hinten bewegt wurde und anschließend korrigiert werden musste. Auch die durchgängig hohen Standardabweichungen ($0,44 \leq SD \leq 5,84$), im Vergleich zu den anderen Techniken, deuten daraufhin, wie schwer die Technik für einige Testpersonen zu kontrollieren war.

Die Anzahl der fehlerhaften Selektion war über alle Szenarien hinweg eher gering. Eine Aussage darüber, ob die Verlangsamung des Cursors bei langsamen Bewegungen tatsächlich zu einer höheren Präzision geführt hat, lässt sich hieraus allerdings schwer ableiten.

Fragebögen

Abbildung 4.20 zeigt die Ergebnisse des System Usability Scales und in Abbildung 4.21 sind die Ergebnisse des NASA Task Load Index visualisiert. Abbildung 4.22 stellt die Ergebnisse der dedizierten Fragen bzgl. Spaß, Natürlichkeit, Präzision und Geschwindigkeit dar. Die Mittelwerte und die dazugehörigen Standardabweichungen sind im Anhang A.8.1 dargestellt. Im Folgenden werden die einzelnen subjektiv erfassten Aspekte in Bezug zu den Techniken gesetzt.

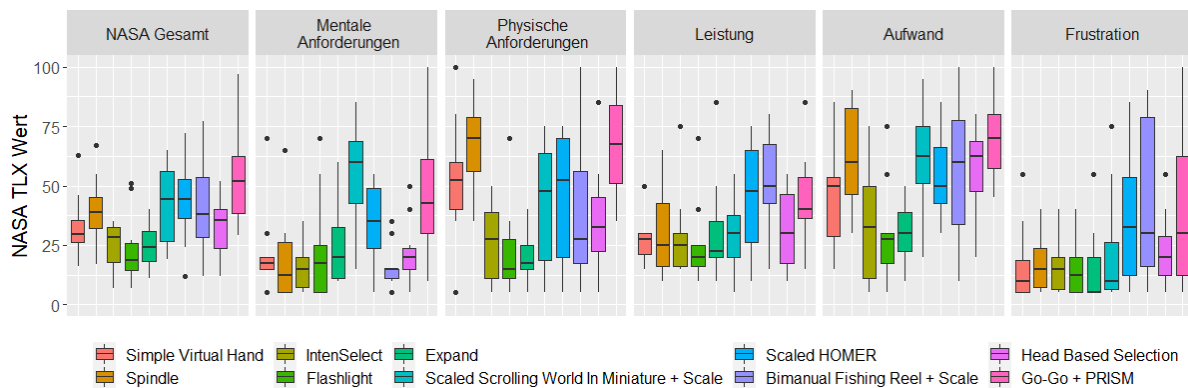


Abbildung 4.21: Ergebnisse des NASA Task Load Index aus der Selektionsstudie.

Simple Virtual Hand Die Testpersonen konnten die *Simple Virtual Hand* Technik ohne viel Übungszeit und ohne größere Probleme nutzen, was vermutlich der Grund für die guten Werte bei der Usability ($\bar{x} = 90,75, SD = 5,78$) ist. Die geringe Standardabweichung hier zeigt, dass alle Testpersonen die Aufgaben ähnlich gut mit der Technik durchführen konnten. *Simple Virtual Hand* kann gut mit dem realen Greifen von Objekten verglichen werden, weshalb viele der Teilnehmenden die Technik vermutlich als natürlich empfanden ($\bar{x} = 4,4, SD = 0,84$). Auch der Spaßfaktor ($\bar{x} = 4,4, SD = 0,52$) und die subjektive Geschwindigkeit ($\bar{x} = 4,5, SD = 0,71$) wurden sehr gut bewertet. Bei der subjektiven Präzision ($\bar{x} = 3,9, SD = 0,74$) schnitt die Technik etwas schlechter ab als bei der Geschwindigkeit ($\bar{x} = 4,5, SD = 0,71$), was vermutlich auf die bereits beschriebene Problematik bei einigen fehlerhaften Selektionen zurückzuführen ist. Der erfahrene Arbeitsaufwand ($\bar{x} = 32,9, SD = 13,33$) ist im Mittel geringer als bei einem Großteil der anderen Techniken. Nur die physischen Anforderungen ($\bar{x} = 52,5, SD = 26,06$) und der allgemeine Aufwand ($\bar{x} = 45,0, SD = 20,0$) wurden etwas höher eingeschätzt, was wohl auf die vielen Armbewegungen zurückzuführen ist.

Spindle Bei den subjektiven Bewertungen zeigt *Spindle* ein etwas anderes Bild als *Simple Virtual Hand*. So wurde vor allem die Usability ($\bar{x} = 76,50, SD = 14,82$) im Mittel schlechter eingeschätzt und auf die Fragen zum Spaßfaktor ($\bar{x} = 3,3, SD = 1,34$) und der Natürlichkeit ($\bar{x} = 3,5, SD = 1,18$) wurden mehr negative und neutrale Einschätzungen gegeben. Die Testpersonen benötigten zwar wieder sehr wenig Zeit zum Erlernen der Technik, allerdings gaben einige Teilnehmende an, dass es sich ungewöhnlich anfühlt, beide Controller zum Objekt zu führen, nur um dieses zu selektieren. Dies hat sich wahrscheinlich auf die genannten Einschätzungen ausgewirkt. Auch die Bewertung der gefühlten Arbeitslast ($\bar{x} = 40,1, SD = 13,94$) spiegelt dies wider. Insbesondere bei den physischen Anforderungen ($\bar{x} = 67,5, SD = 17,99$) und dem allgemeinen Aufwand ($\bar{x} = 62,0, SD = 21,11$) gehört die Technik im Mittel zu den schlechtesten Techniken, was wie bei *Simple Virtual Hand* vermutlich daran liegt, dass die Arme viel bewegt werden müssen.

IntenSelect Die gute Performance der Technik in allen Szenarien schlägt sich auch auf die subjektiven Einschätzungen der Testpersonen nieder. Die Usability ($\bar{x} = 86,5, SD = 14,78$) zählt im Mittel zu den besten aller Techniken. Auch hinsichtlich des Spaßfaktors

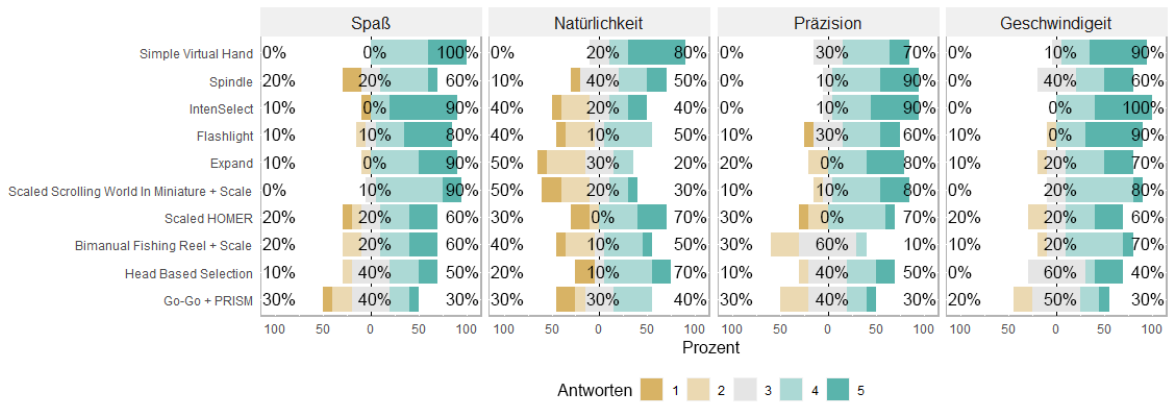


Abbildung 4.22: Ergebnisse der Fragen bzgl. Spaß, Natürlichkeit, Präzision und Geschwindigkeit aus der Selektionsstudie.

($\bar{x} = 4,4, SD = 1,26$) und der subjektiven Präzision ($\bar{x} = 4,4, SD = 0,7$), sowie der Geschwindigkeit ($\bar{x} = 4,6, SD = 0,52$) erhielt *IntenSelect* nahezu ausschließlich positive Bewertungen. Bei der Natürlichkeit ($\bar{x} = 3,1, SD = 1,37$) gab es dagegen einige neutrale und eine negative Einschätzung, wobei die Meinungen der Teilnehmenden hier weit auseinandergehen. Grund hierfür könnte sein, dass das Zeigen auf ein Objekt zwar natürlich wirkt, man den roten Lichtstrahl, der sich an die Objekte heftet, so allerdings nicht aus einer realen Interaktion kennt. Auch der Arbeitsaufwand ($\bar{x} = 24,4, SD = 10,46$) wurde als gering eingeschätzt und die Teilaspekte erhielten durchgängig eine entsprechend positive Bewertung.

Flashlight Bei der *Flashlight* Technik fallen die Einschätzungen der Testpersonen ähnlich positiv aus wie bei *IntenSelect*. Die Usability ($\bar{x} = 91,5, SD = 9,8$), der Spaßfaktor ($\bar{x} = 4,2, SD = 1,03$) und die gefühlte Geschwindigkeit ($\bar{x} = 4,4, SD = 0,97$) wurden erneut sehr positiv bewertet. Hervorzuheben ist die etwas schlechtere bewertete gefühlte Präzision ($\bar{x} = 3,6, SD = 1,17$). Dies könnte daran liegen, dass das Zentrum des Kegels nicht direkt erkennbar ist, welches aber maßgeblich für die Bestimmung des markierten und letztendlich selektierten Objekts verantwortlich ist. Die Natürlichkeit ($\bar{x} = 3,0, SD = 1,15$) der Technik wurde im Mittel neutral bewertet. Auch wenn die Metapher der Taschenlampe aus der Realität bekannt ist, war es für die Teilnehmenden wohl eher ungewöhnlich, damit Objekte auszuwählen. Die Arbeitslast ($\bar{x} = 23,5, SD = 14,99$) wurde im Mittel als die geringste unter allen Techniken eingeschätzt.

Expand Die mehrstufige Selektion bei *Expand* wirkte sich anscheinend nicht merklich negativ auf die Usability ($\bar{x} = 85,0, SD = 18,41$) aus. Auch die gefühlte Arbeitslast gehört im Mittel zu der geringsten aller Techniken ($\bar{x} = 24,8, SD = 9,05$). Weiterhin wurde beim Spaßfaktor ($\bar{x} = 4,2, SD = 0,92$) ein sehr guter durchschnittlicher Wert erreicht.

Bei der Natürlichkeit ($\bar{x} = 2,6, SD = 0,97$) erhielt die Technik vorrangig negative und neutrale Bewertungen. Dies kann daran liegen, dass eine derartige zweistufige Selektion eher ungewöhnlich in der Realität ist. Die zweistufige Selektion ist vermutlich auch der Grund für die wenigen neutralen und negativen Bewertungen der Geschwindigkeit ($\bar{x} = 3,9, SD = 0,99$). Dennoch ist der hier erreichte hohe Wert überraschend, da die Technik in

einigen Szenarien zu den langsamsten zählt. In vielen Szenarien konnte das Zielobjekt aber auch bereits in der ersten Phase ausgewählt werden und die ansonsten relativ konstante Geschwindigkeit der Technik führte wohl zu dieser positiven subjektiven Wahrnehmung. Die Präzision ($\bar{x} = 4,0, SD = 1,15$) wurde im Allgemeinen als eher positiv eingeschätzt.

Scaled Scrolling World In Miniature + Scale Die Usability der Technik ($\bar{x} = 67,5, SD = 19,18$) gehört im Mittel zu den schlechtesten der Studie, wobei die hohe Standardabweichung auf die unterschiedlichen Meinungen der Testpersonen hinweist. Die Testpersonen nutzten die fünf Minuten Übungszeit oft aus und es konnte beobachtet werden, dass sie häufig Probleme mit der Skalierung der Miniaturwelt hatten. Einige Testpersonen gaben außerdem an, dass die Technik zu komplex sei, um nur Objekte zu selektieren. Auch der Arbeitsaufwand ($\bar{x} = 41,8, SD = 16,98$) wurde im Mittel höher eingeschätzt als bei den meisten anderen Techniken. Insbesondere die mentalen Anforderungen ($\bar{x} = 54,0, SD = 23,07$) wurden als eher hoch empfunden, was vermutlich auf die komplexe Handhabung des Miniaturmodells zurückzuführen ist. Die physischen Anforderungen ($\bar{x} = 42,0, SD = 26,89$) und der allgemeine Aufwand ($\bar{x} = 60,5, SD = 24,2$) wurden höher eingeschätzt, wobei hier erneut eine hohe Abweichung unter den Testpersonen erkennbar ist.

Die Technik wurde insgesamt als eher unnatürlich bewertet ($\bar{x} = 2,7, SD = 1,34$). Zwar sind Miniaturmodelle ein bekanntes Element aus der Realität und auch die Bedienung mit der dominanten Hand gestaltet sich als natürlich; Objekte über ein Miniaturmodell auszuwählen, scheint dennoch eher unnatürlich zu sein. Den Kommentaren der Testpersonen war zu entnehmen, dass die Technik als etwas Neues empfunden wurde, was sich vermutlich auch auf den hohen Spaßfaktor ($\bar{x} = 4,1, SD = 0,57$) ausgewirkt hat. Auch die gefühlte Präzision ($\bar{x} = 4,0, SD = 0,94$) und Geschwindigkeit ($\bar{x} = 3,9, SD = 0,57$) wurden als hoch empfunden. Somit scheinen sich die kleinere Darstellung der Objekte und die komplexere Bedienung nicht negativ auf diese gefühlten Faktoren ausgewirkt zu haben.

Scaled HOMER Die allgemeine Usability ($\bar{x} = 76,5, SD = 22,02$) wird im Mittel als durchschnittlich im Vergleich zu den anderen Techniken eingeschätzt. Hier gab es jedoch eine hohe Varianz zwischen den Teilnehmenden und bei den Beobachtungen war zu erkennen, dass es einigen Testpersonen leichter fiel, die Hand ruhig zu halten und so besser kleine und entfernte Objekte auszuwählen und sie bescheinigten der Technik auch entsprechend eine bessere Usability.

Unerwartet positiv fallen die Bewertungen für die empfundene Geschwindigkeit ($\bar{x} = 3,7, SD = 1,16$) und Präzision ($\bar{x} = 3,4, SD = 1,26$) aus, aber auch hier gibt es einige neutrale und negative Einschätzungen. In den einfachen Szenarien funktionierte die Technik sehr gut, weshalb diese Einschätzung vermutlich zustande kommt und auch hier weichen die Meinungen der Testpersonen stärker als bei den anderen Techniken voneinander ab. Die Natürlichkeit ($\bar{x} = 3,5, SD = 1,58$) erhielt mehr positive Stimmen als andere Techniken, weil das Zeigen auf ein Objekt vermutlich aus der Realität bekannt ist, aber auch hier haben sich die Probleme durch einige wenige negative Einschätzungen ausgewirkt.

Die Arbeitslast ($\bar{x} = 43,2, SD = 16,76$) wurde im Mittel im Vergleich zu den meisten anderen Techniken als höher empfunden. Insbesondere der allgemeine Aufwand ($\bar{x} = 54,0, SD = 17,76$), die physischen Anforderungen ($\bar{x} = 46,5, SD = 27,39$) und die Frustration ($\bar{x} = 35,0, SD = 26,46$) wurden hoch bewertet. Dies kann, wie bereits erwähnt, auf das Problem bei einigen Testpersonen zurückgeführt werden, den Arm in den schwierigen Szenarien lange Zeit ruhig halten zu müssen.

Bimanual Fishing Reel + Scale Auch die subjektiven Bewertungen von *Bimanual Fishing Reel + Scale* ähneln stark den Ergebnissen von *Scaled HOMER*. Auffällig ist nur die hohe Anzahl an negativen und neutralen Bewertungen bei der gefühlten Präzision ($\bar{x} = 2,8, SD = 0,63$). Hierfür könnte die Darstellung des Lichtstahls verantwortlich sein.

Head-based Selection Die Usability ($\bar{x} = 83,75, SD = 13,03$) wurde von den Testpersonen trotz Problemen bei kleinen entfernten Objekten als eher gut im Vergleich zu den anderen Techniken bewertet. Auch wenn bei dieser Technik die Hände nicht verwendet wurden, wurde die Natürlichkeit ($\bar{x} = 3,5, SD = 1,43$) als vergleichsweise hoch eingeschätzt. Eine vergleichbare Metapher aus der realen Welt wäre das Fokussieren eines Objekts von Interesse mit den Augen. Beim Spaßfaktor ($\bar{x} = 3,6, SD = 0,97$) wurden mehr negative und neutrale Stimmen im Vergleich zu den anderen Techniken vergeben, was auch durch Kommentare einiger Testpersonen bestätigt wurde, die die Interaktion mit den Händen vermissen. Bei der Arbeitslast ($\bar{x} = 33,4, SD = 13,22$) liegt die Technik im Mittelfeld. Der physische Aufwand ($\bar{x} = 35,5, SD = 23,97$) wurde etwas höher bewertet und insbesondere der allgemeine Aufwand ($\bar{x} = 55,5, SD = 21,14$) wurde negativer bewertet. Gründe hierfür könnten das teilweise lange Konzentrieren auf einen Punkt und das damit verbundene Stillhalten des Kopfes sein.

Go-Go + PRISM Bei der *Go-Go + PRISM* wurde sehr viel mehr von der Übungszeit verwendet als bei anderen Techniken, und einige Testpersonen merkten selbst an, dass noch mehr Einarbeitungszeit dabei geholfen hätte, sich an die Abbildungsfunktion zu gewöhnen. Dies wirkte sich, neben dem unvorhersehbaren Verhalten, vermutlich auf die subjektive Usability ($\bar{x} = 57,0, SD = 16,99$) aus, die im Mittel als die schlechteste von allen Techniken eingeschätzt wurde. Auch die induzierte Arbeitslast ($\bar{x} = 53,4, SD = 19,77$) wird unter allen Techniken im Mittel als am höchsten eingeschätzt. Die erhöhten mentalen Anforderungen ($\bar{x} = 46,0, SD = 26,85$) lassen sich wahrscheinlich auf das unvorhersehbare Verhalten der Technik zurückführen, weswegen sich die Testpersonen stark konzentrieren mussten, um den Cursor korrekt zu kontrollieren. Der Arm musste außerdem oft ausgestreckt werden und es waren viele kleine und größere Korrekturen nötig, was wohl zu den höheren physischen Anforderungen ($\bar{x} = 66,5, SD = 21,61$) und einen einem größeren allgemeinen Aufwand ($\bar{x} = 71,0, SD = 17,13$) führte. Darüber hinaus wurden die eigene Leistung ($\bar{x} = 44,5, SD = 19,5$) und die Frustration ($\bar{x} = 39,00, SD = 31,43$) aufgrund der genannten Probleme vermutlich negativer eingeschätzt.

Die dedizierten Fragen zum Spaßfaktor ($\bar{x} = 3,0, SD = 1,15$), der gefühlten Präzision ($\bar{x} = 3,1, SD = 0,99$) und der Geschwindigkeit ($\bar{x} = 3,2, SD = 0,92$) erhielten ebenfalls eine Vielzahl neutraler und negativer Antworten. Die Natürlichkeit ($\bar{x} = 2,9, SD = 1,2$) wurde als eher gering eingeschätzt, obwohl *Go-Go + PRISM* auf einer *Virtual Hand* Technik

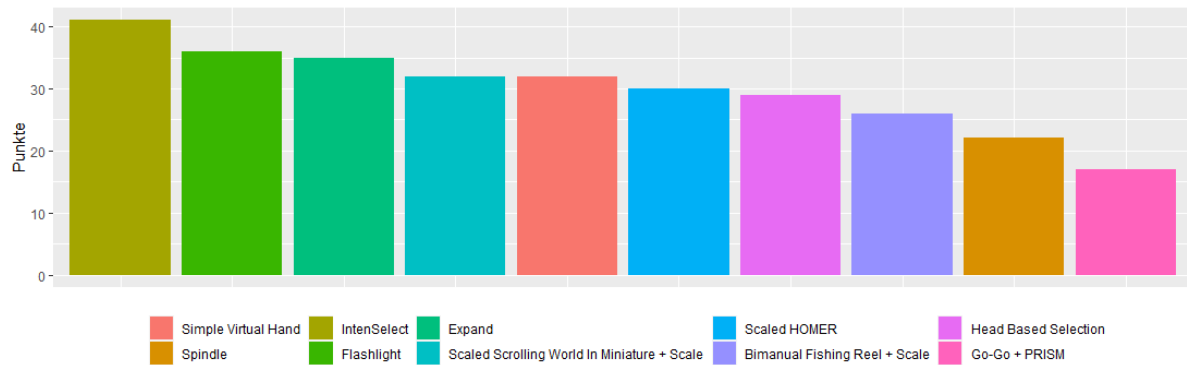


Abbildung 4.23: Aggregierte Sortierung der Techniken durch die Testpersonen der Selektionsstudie.

basiert. Ob sich hier die Verlängerung des Arms oder das unkontrollierte Verhalten negativ ausgewirkt hat, ist schwer zu sagen. Bei einem Großteil der subjektiven Einschätzungen ist eine hohe Varianz zwischen den Teilnehmenden erkennbar, was darauf hindeutet, dass die Technik stark nutzerabhängig ist und einige Testpersonen besser als andere den Cursor kontrollieren konnten.

Sortierung der Techniken

Abbildung 4.23 visualisiert die Sortierung der Interaktionstechniken hinsichtlich eigener Präferenzen der Testpersonen. Dabei erhielt eine Technik fünf Punkte, wenn sie von einer Testperson auf den ersten Platz gesetzt wurde und einen Punkt für den letzten Platz. Die Sortierung deckt sich größtenteils mit den Resultaten aus der Studie. *IntenSelect* belegt den ersten Platz und erreicht sehr gute Zeiten und Bewertungen der Testpersonen. *Expand* liegt unerwartet weit vorne, da die Technik in einigen Szenarien zu den langsamsten zählt. Dafür sind die Zeiten im Mittel relativ konstant und die Technik erreichte gute Werte bei der Präzision und der Benutzbarkeit. Auch *Scaled Scrolling World In Miniature + Scale* liegt unerwartet weit vorne, was vermutlich an der Neuheit der Technik liegt. *Spindle* belegt trotz akzeptabler Zeiten den vorletzten Platz. Grund hierfür ist vermutlich die aufwändige Selektion mit beiden Händen. *Go-Go + PRISM* liegt wahrscheinlich aufgrund des unvorhersehbaren Verhaltens auf dem letzten Platz.

4.5.2 Manipulation

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Teilstudie zur Manipulation beleuchtet. Dabei wurden 8 Techniken in verschiedenen Szenarien getestet, in denen Objektgröße, Aufgabentyp und Manipulationsgrad variiert wurden.

Zeit und Präzision

In diesem Abschnitt werden die Techniken hinsichtlich der für die Lösung der Aufgaben benötigten Zeiten und der erreichten Präzision betrachtet. In Abbildung 4.24 sind die Zeiten in Form eines Box-Plot Diagramms dargestellt. Abbildung 4.25 zeigt den durchschnittlichen prozentualen Anteil an Timeouts in den verschiedenen Szenarien. Die Techniken *Simple Virtual Hand* und *Spindle* sind in dieser Abbildung nicht aufgeführt, da mit diesen in keiner Aufgabe mehr als 30 Sekunden für das Lösen einer Aufgabe benötigt wurde.

Die Abbildungen 4.26, 4.27 und 4.28 zeigen die erreichte Präzision hinsichtlich der Position, der Rotation und der Objektgröße. Dabei wird immer angegeben, wie stark sich das zu manipulierende Objekt von dem vorgegebenen Zielobjekt unterscheidet, nachdem die Aufgabe erfolgreich gelöst wurde. Hierbei ist zu beachten, dass nur die Ergebnisse der Aufgaben einfließen, die korrekt gelöst wurden, wo also nicht mehr als 30 Sekunden benötigt wurden. Die Präzision auf mittlerer oder großer Distanz wird im Folgenden selten betrachtet, da hier eine hohe Varianz in den Daten erkennbar ist. Durch die Distanz zum Objekt war es für die Testpersonen schwer abzuschätzen, wie gut die Position, Rotation und Größe des zu manipulierenden Objekts mit dem Zielobjekt übereinstimmen, und keine Technik bot einen Mechanismus, um hierbei zu unterstützen.

Im Anhang A.8.2 sind die erreichten Mittelwerte (\bar{x}) und die zugehörigen Standardabweichungen (SD) in den einzelnen Szenarien angegeben. Auf diese wird im Folgenden vereinzelt eingegangen. Wie in der Beschreibung der Ergebnisse aus der Selektionsstudie werden die Mittelwerte und Standardabweichungen für mehrere Szenarien zur Verbesserung der Lesbarkeit ggf. zusammengefasst und als \bar{x}_c und SD_c gekennzeichnet.

Die Korrelationskoeffizienten (ρ) sind in Tabelle 4.3 abgebildet, wobei für jede Technik überprüft wurde, ob ein Zusammenhang zwischen den Zeiten bzw. den drei getrennt erfassten Präzisionswerten und der Distanz zum Objekt oder dem Manipulationsgrad festgestellt werden kann. Die Korrelationen wurden gesondert für jeden Manipulationstyp bestimmt, da auf Basis der Visualisierung ein großer Einfluss dieser unabhängigen Variablen erkennbar ist. Im Folgenden wird der Manipulationstyp entsprechend tiefgestellt angegeben. So steht ρ_{prs} beispielsweise für den Korrelationskoeffizienten zusammengefasst für die Aufgaben, bei denen die Positionierung, Rotation und Skalierung durchgeführt werden mussten. Eine detaillierte Aufstellung der Korrelationskoeffizienten für jede Kombination von unabhängigen Variablen kann in Anhang A.9 gefunden werden. Im Allgemeinen kann bei den gemessenen Präzisionen nur in wenigen Fällen eine signifikante Korrelation mit der Distanz oder dem Manipulationsgrad festgestellt werden, was vermutlich, wie bereits angesprochen, an den hohen Varianzen liegt. Aus diesem Grund wird hierauf im Folgenden nur in besonderen Fällen eingegangen. Im Anhang A.9 ist außerdem ein Streudiagramm dargestellt, in dem jede Zeitmessung für jede Aufgabe kategorisiert nach den unabhängigen Variablen Manipulationstyp, Distanz zum Objekt und Manipulationsgrad visualisiert ist.

Simple Virtual Hand *Simple Virtual Hand* konnte nur für Aufgaben auf kurze Distanz und ohne Skalierung getestet werden. Unabhängig vom Aufgabentyp gehörte die Technik im Mittel zu den schnellsten Techniken. Sobald die Rotation nötig ist, lässt ein höherer

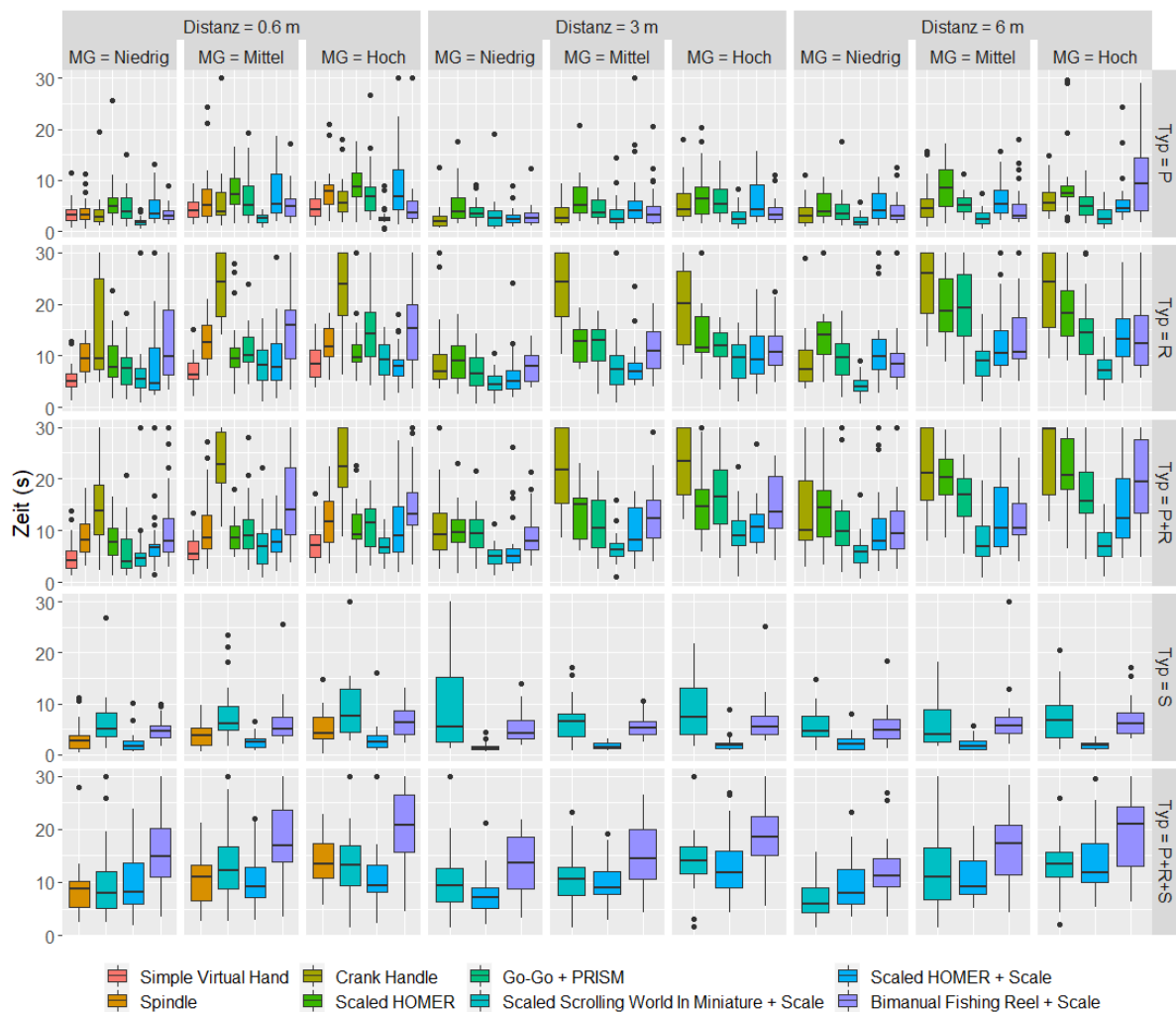


Abbildung 4.24: Zeiten der Manipulationsstudie (MG = Manipulationsgrad).

Manipulationsgrad eine geringfügige Verschlechterung der Zeiten vermuten ($\rho_{pr} = 0,3$, $\rho_r = 0,39$). Bei der ausschließlichen Positionierung ist keine signifikante Korrelation feststellbar.

Für das Positionieren und Rotieren ($\bar{x}_c = 6,18s$, $SD_c = 3,45s$) wurde im Durchschnitt erwartungsgemäß mehr Zeit benötigt als für das ausschließliche Positionieren ($\bar{x}_c = 4,36s$, $SD_c = 2,33s$). Hervorzuheben ist aber, dass sich die Zeiten für das ausschließliche Rotieren ($\bar{x}_c = 7,2s$, $SD_c = 3,28s$) im Mittel ähnlich zu den Zeiten der Aufgaben verhalten, die sowohl Rotation als auch Positionierung erforderten. Dies ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass sich die Objekte bei Aufgaben, wo nur die Rotation erforderlich war, anfangs überlappten und es teilweise schwer erkennbar war, wie das Objekt am besten gedreht werden musste. Deshalb mussten die Testpersonen das Objekt zuerst umplatzieren und konnten erst dann planen, wie das Objekt gedreht werden muss. Somit schloss die Interaktion bei dieser Aufgabe oft eine Positionierung mit ein, obwohl nur eine Rotation erforderlich war.

Simple Virtual Hand gehörte im Mittel durchgängig zu den Techniken mit der geringsten Abweichung zur Zielposition, wobei kaum Auswirkungen durch den Manipulationsgrad oder den Manipulationstypen erkennbar sind. Auch die durchschnittlich erreichte Prä-

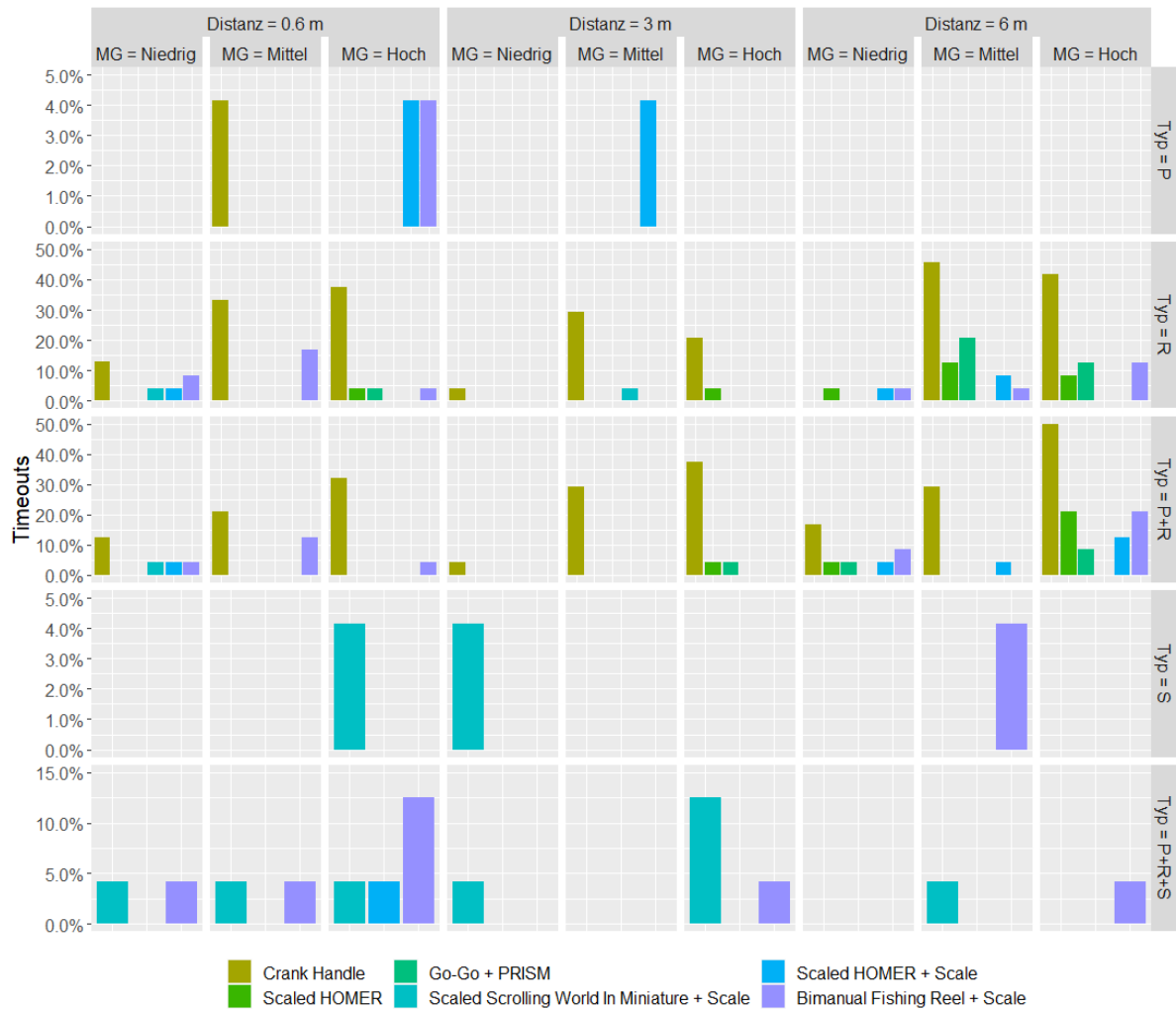


Abbildung 4.25: Timeouts der Manipulationsstudie (MG = Manipulationsgrad).

zision bzgl. der Rotation ist eine der besten unter den Techniken, die keine separierte Transformation ermöglichen. Auch hier sind kaum Auswirkungen durch die unabhängigen Variablen erkennbar.

Spindle *Spindle* ist, wie *Simple Virtual Hand*, nur auf kurze Distanz testbar, ermöglicht aber zusätzlich die Skalierung. Bei Aufgaben, die nur die Positionierung erfordern und einen geringen Manipulationsgrad aufweisen, gehört *Spindle* noch zu den schnellsten Techniken ($\bar{x} = 4,01s$, $SD = 2,7s$). Ab einem mittleren Manipulationsgrad verschlechtern sich die Zeiten aber scheinbar ($\bar{x} = 7,05s$, $SD = 5,72s$) und beim höchsten Manipulationsgrad gehört *Spindle* zu den langsamsten Techniken ($\bar{x} = 8,02s$, $SD = 4,54s$), was sich in einer moderaten Korrelation äußert ($\rho_p = 0,42$).

Die Auswirkungen des Manipulationsgrades auf die Zeiten machen sich auch bemerkbar, wenn alle Translationen durchgeführt werden müssen ($\rho_{prs} = 0,42$). Bei den anderen Manipulationstypen ist allerdings nur eine geringe Korrelation zwischen Manipulationsgrad und Zeit erkennbar ($0,24 \leq \rho \leq 0,29$). Bei Aufgaben, die nur die Rotation oder die Rotation und Positionierung des Objekts erfordern, zählt *Spindle* im Mittel allerdings allgemein zu den langsamsten Techniken ($\bar{x}_c = 11,08s$, $SD_c = 4,89s$). Hierfür können zwei Fakto-

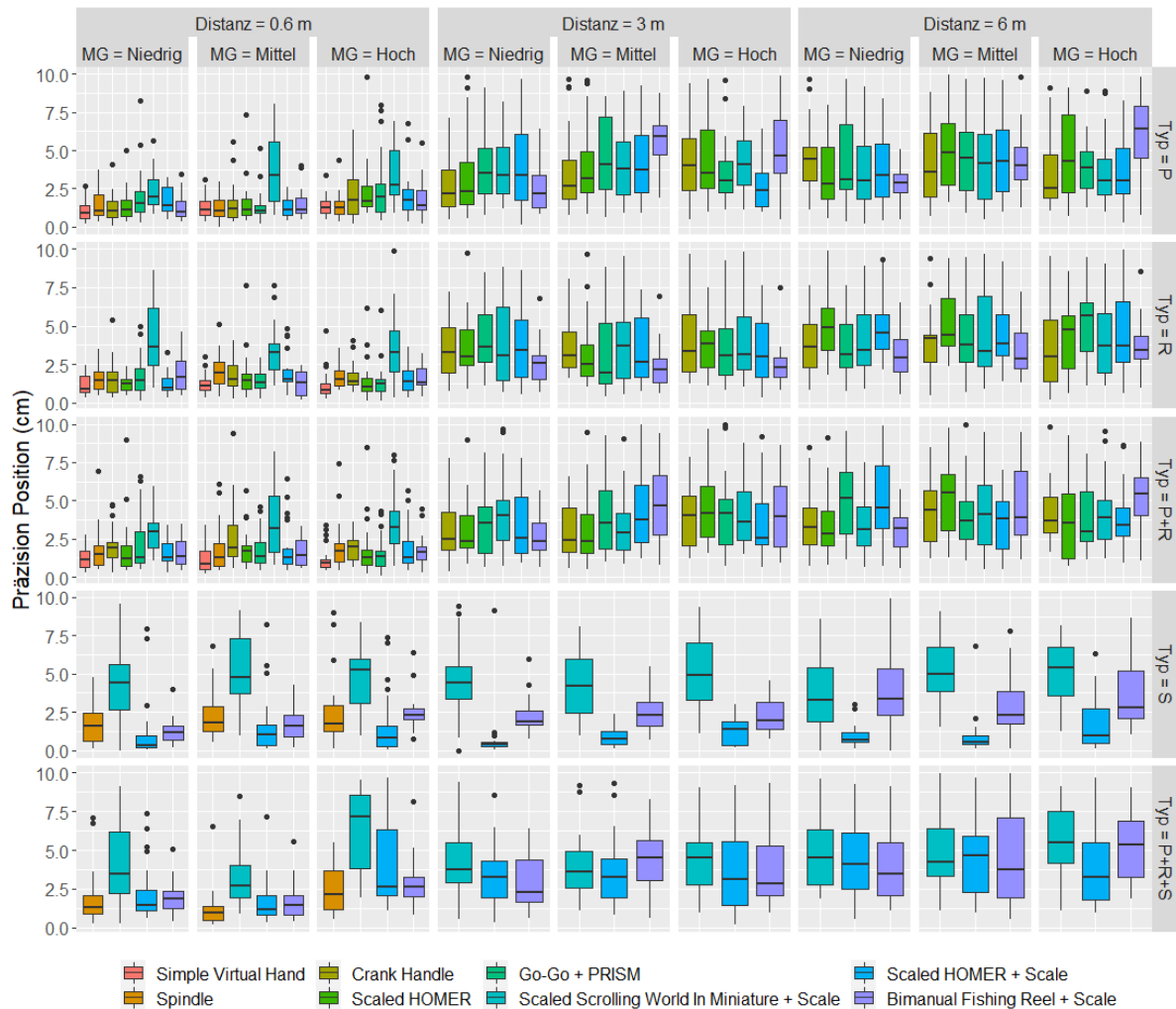


Abbildung 4.26: Präzision der Position der Manipulationsstudie (MG = Manipulationsgrad). Die y-Achse gibt an, wie stark sich die Endposition von der Zielposition unterschied.

ren ursächlich sein. Zum einen ist eine Drehung des Objekts um die Achse des Controllers nicht direkt möglich. Wie bereits beschrieben, muss entweder eine Fahrradbewegung durchgeführt werden, die ungenau sein und schnell zum Überdrehen führen kann, oder die Testpersonen mussten umgreifen. Bei den Beobachtungen konnte festgestellt werden, dass beide Varianten genutzt wurden, aber beide auch entsprechend zusätzliche Zeit kosteten. Dies ist daran erkennbar, dass Aufgaben, die auch die Rotation erforderten, im Mittel merklich mehr Zeit in Anspruch nahmen als Aufgaben ohne Rotation. Außerdem ermöglicht die Technik gleichzeitig die Rotation, Positionierung und Skalierung von Objekten. Wenn also z.B. eine Aufgabe keine Skalierung des Objekts erforderte, konnte beobachtet werden, dass bei der Manipulation des Objekts unweigerlich auch die Größe verändert wurde, weshalb die Testpersonen auch darauf achten mussten, das Objekt richtig zu skalieren. Dies zeigt sich ebenfalls bei der erreichten Präzision bei der Objektgröße, denn auch bei Aufgaben, wo keine Skalierung nötig ist, weicht die finale Objektgröße über alle Manipulationsgrade hinweg im geringen Maße von der Zielgröße ab. Dies könnte der Grund dafür sein, dass sich die durchschnittlichen Zeiten bei Aufgaben, die die Positionierung und Rotation erfordern ($\bar{x}_c = 10,65s, SD_c = 5,59s$), nur geringfügig von denen unterscheiden, wo zusätzlich das Objekt skaliert werden musste ($\bar{x}_c = 10,94s, SD_c = 5,26s$). Bei

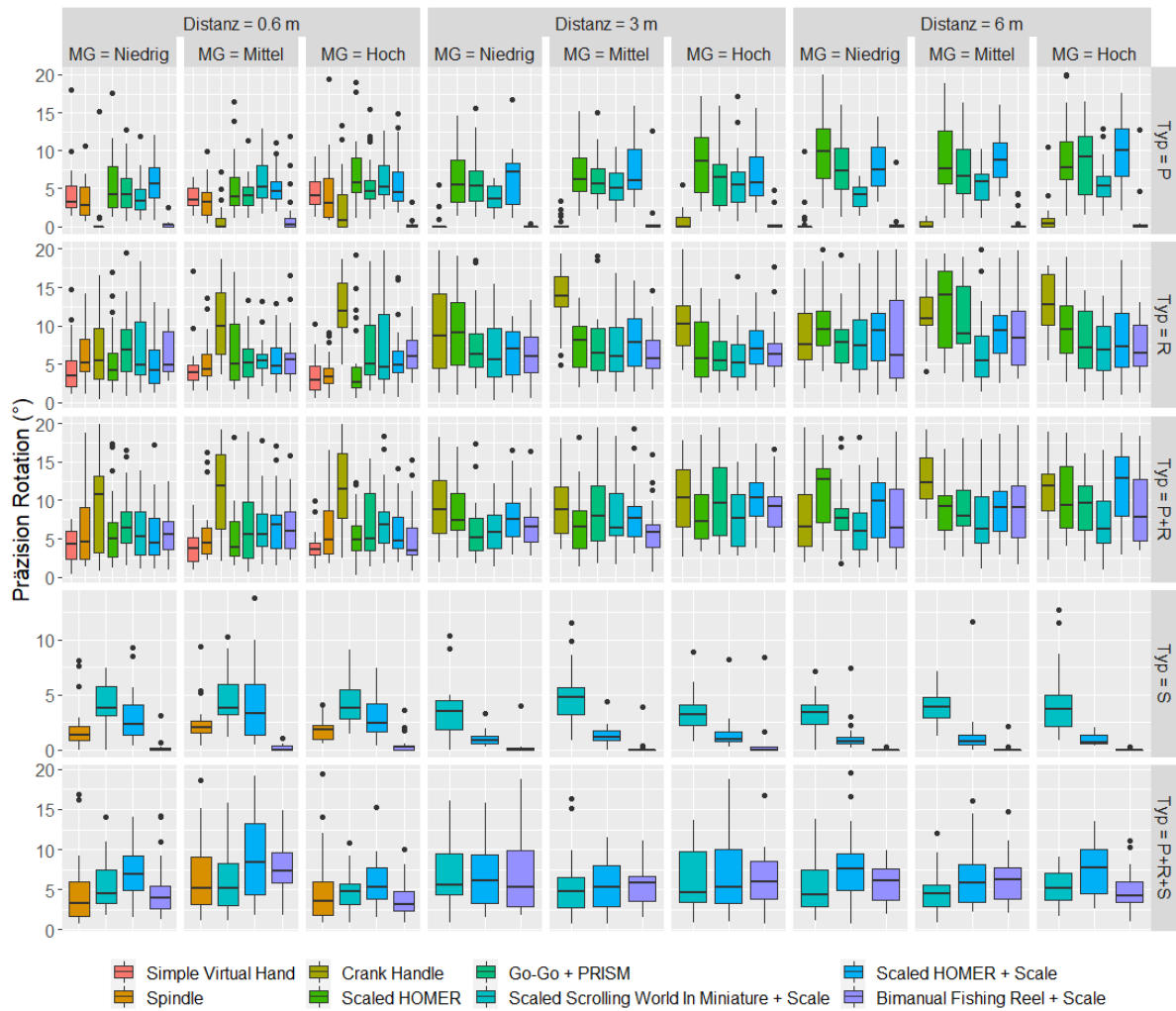


Abbildung 4.27: Präzision der Rotation der Manipulationsstudie (MG = Manipulationsgrad). Die y-Achse gibt an, wie stark sich die Endrotation von der Zielrotation unterscheidet.

den entsprechenden Aufgaben erreicht die Technik im Mittel ähnliche Werte wie *Scaled Scrolling World In Miniature + Scale* und *Scaled HOMER + Scale*. Ebenso kann das Verhalten darauf hindeuten, dass die Skalierung mit der Technik sehr gut funktionierte und nur einen geringen Mehraufwand nach sich zog. Bei Aufgaben, die nur die Skalierung erforderten ($\bar{x}_c = 4,04s$, $SD_c = 2,96s$), war im Mittel nur *Scaled HOMER + Scale* schneller, was ebenfalls auf eine gut funktionierende Skalierungsfunktion hindeuten könnte.

Auswirkungen der fehlenden Rotation um die Achse, welche die beiden Controller verbindet, sind bei der Präzision bzgl. der Rotation schwer erkennbar. Hier verhält sich *Spindle* im Durchschnitt ähnlich wie die meisten anderen Techniken.

Crank Handle *Crank Handle* gehört im Durchschnitt zu den schnellsten Techniken, wenn das Objekt nur über eine kurze Strecke positioniert werden muss ($\bar{x}_c = 3,3s$, $SD_c = 2,87s$). Hier muss das Objekt nur gegriffen und zur Zielposition bewegt werden. Sobald sich der Manipulationsgrad allerdings erhöht, wird die Technik merklich langsamer ($\bar{x}_c = 5,58s$, $SD_c = 4,02s$). Es konnte beobachtet werden, dass das Objekt für längere

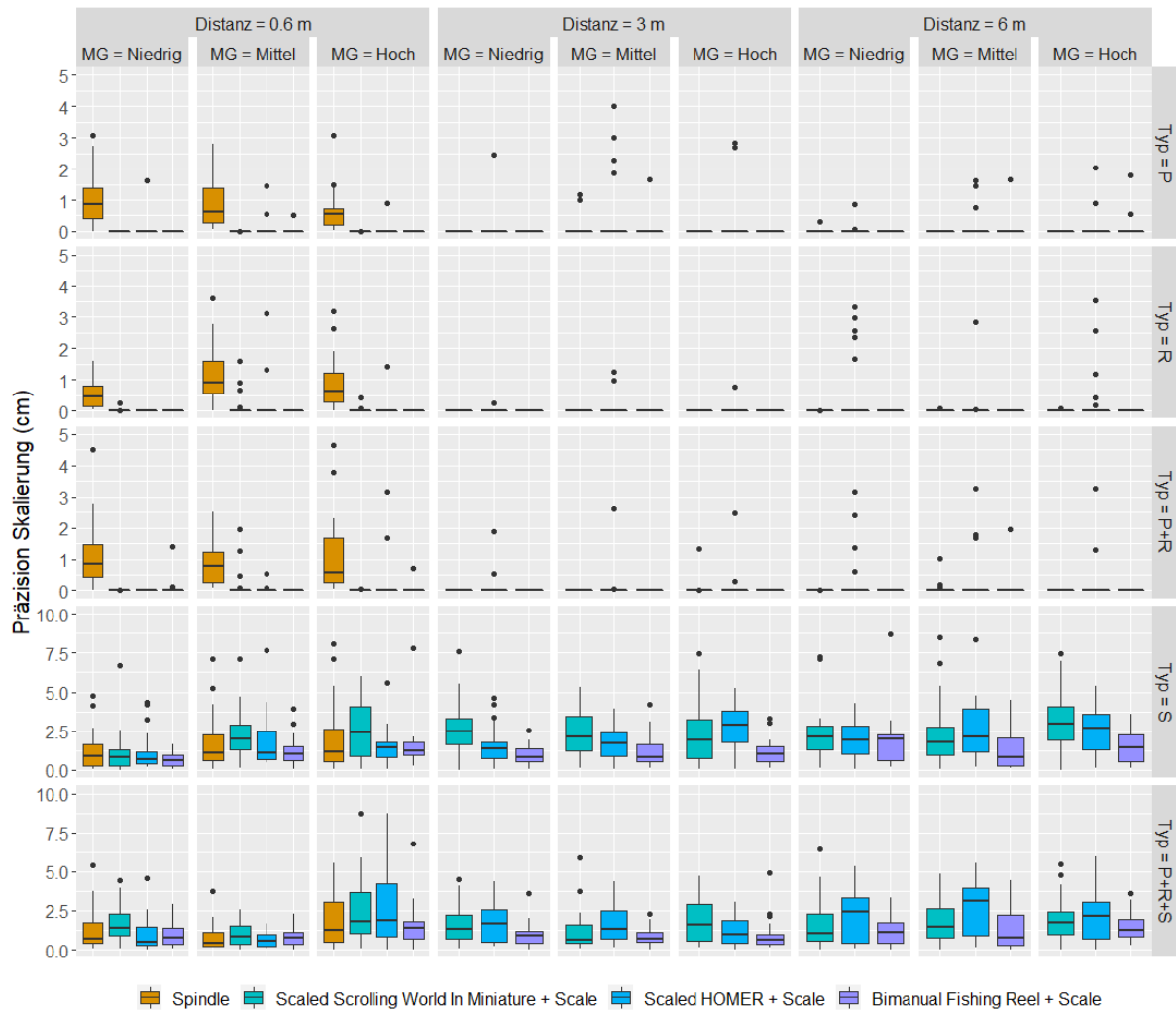


Abbildung 4.28: Präzision der Skalierung der Manipulationsstudie (MG = Manipulationsgrad). Die y-Achse gibt an, wie stark sich die finale Objektgröße von der Zielobjektgröße unterschied.

Strecken teilweise mehrmals gegriffen werden musste und dabei öfter versehentlich in den Rotationsmodus gewechselt wurde, was vermutlich eine Verschlechterung zur Folge hatte. Erkennbar ist dies auch bei der Präzision bzgl. der Rotation, die mit steigendem Manipulationsgrad geringfügig schlechter wird ($\rho = 0,34$), obwohl die Technik eine separierte Positionierung und Drehung ermöglicht.

Sobald eine Aufgabe die Rotation erfordert, benötigen die Testpersonen im Mittel sehr viel Zeit, um die Aufgaben mit dieser Technik zu lösen. Bei einem geringen Manipulationsgrad scheint die Technik noch bessere Zeiten zu ermöglichen ($\bar{x}_c = 12,19s$, $SD_c = 8,05s$), weil hier nur um eine Achse gedreht werden muss und die Separation, die die Technik ermöglicht, ausgenutzt werden kann. Von den Testpersonen wurde jedoch nicht immer erkannt, wenn das Objekt nur um eine Achse gedreht werden musste, was auch die hohen Varianzen in den Daten zeigen. Sobald der Manipulationsgrad anstieg, wurden dagegen schlechtere Zeiten erreicht ($\bar{x}_c = 22,65s$, $SD_c = 6,9s$), was anhand der Korrelationskoeffizienten erkennbar ist ($\rho_{pr} = 0,48, \rho_r = 0,49$). *Crank Handle* erreichte in diesen Szenarien die mit Abstand höchste Anzahl an Timeouts, sobald die Rotation des Objekts erfor-

Interaktionstechnik	Typ	Zeit						Präzision Position				Präzision Rotation				Präzision Skalierung			
		Distanz		MG		Distanz		MG		Distanz		MG		Distanz		MG			
		ρ	p	ρ	p	ρ	p	ρ	p	ρ	p	ρ	p	ρ	p	ρ	p		
Simple Virtual Hand	P	-	-	0,21	0,07	-	-	0,17	0,16	-	-	0,11	0,34	-	-	-	-		
	R	-	-	0,39	0,00	-	-	-0,10	0,41	-	-	-0,11	0,34	-	-	-	-		
	P,R	-	-	0,30	0,01	-	-	-0,07	0,58	-	-	-0,07	0,55	-	-	-	-		
Spindle	P	-	-	0,42	0,00	-	-	-0,02	0,85	-	-	0,09	0,46	-	-	-0,23	0,06		
	R	-	-	0,29	0,01	-	-	0,07	0,53	-	-	-0,31	0,01	-	-	0,14	0,26		
	P,R	-	-	0,24	0,04	-	-	0,07	0,58	-	-	0,09	0,45	-	-	-0,07	0,58		
	S	-	-	0,27	0,02	-	-	0,11	0,34	-	-	0,08	0,51	-	-	0,14	0,23		
	P,R,S	-	-	0,42	0,00	-	-	0,21	0,08	-	-	0,03	0,82	-	-	0,13	0,27		
Crank Handle	P	-0,01	0,92	0,43	0,00	0,48	0,00	0,11	0,10	-0,07	0,31	0,34	0,00	-	-	-	-		
	R	-0,07	0,28	0,49	0,00	0,42	0,00	0,01	0,93	0,07	0,39	0,31	0,00	-	-	-	-		
	P,R	-0,02	0,76	0,48	0,00	0,36	0,00	0,09	0,27	-0,01	0,89	0,18	0,02	-	-	-	-		
Scaled HOMER	P	-0,02	0,80	0,29	0,00	0,49	0,00	0,18	0,01	0,33	0,00	0,08	0,27	-	-	-	-		
	R	0,47	0,00	0,25	0,00	0,66	0,00	-0,01	0,87	0,45	0,00	-0,09	0,18	-	-	-	-		
	P,R	0,56	0,00	0,27	0,00	0,45	0,00	0,06	0,38	0,42	0,00	-0,06	0,41	-	-	-	-		
Go-Go + PRISM	P	-0,10	0,16	0,24	0,00	0,43	0,00	0,02	0,79	0,33	0,00	0,04	0,54	-	-	-	-		
	R	0,19	0,01	0,37	0,00	0,52	0,00	-0,03	0,67	0,22	0,00	-0,06	0,38	-	-	-	-		
	P,R	0,35	0,00	0,38	0,00	0,48	0,00	-0,07	0,30	0,20	0,00	0,15	0,03	-	-	-	-		
Scaled Scrolling World In Miniature + Scale	P	0,01	0,88	0,15	0,03	0,13	0,05	0,11	0,11	0,00	0,99	0,28	0,00	-0,07	0,32	0,00	0,99		
	R	-0,10	0,14	0,39	0,00	0,05	0,44	-0,03	0,71	0,08	0,24	-0,01	0,89	-0,15	0,03	-0,02	0,73		
	P,R	0,05	0,44	0,33	0,00	0,11	0,12	0,06	0,40	0,05	0,49	0,11	0,10	-0,09	0,17	0,02	0,74		
	S	-0,12	0,07	0,16	0,02	-0,03	0,61	0,16	0,02	-0,09	0,18	0,03	0,71	0,13	0,05	0,15	0,03		
	P,R,S	-0,08	0,25	0,36	0,00	0,14	0,05	0,13	0,06	-0,04	0,56	-0,03	0,69	0,02	0,81	0,11	0,12		
Scaled HOMER + Scale	P	-0,05	0,48	0,28	0,00	0,46	0,00	-0,03	0,62	0,39	0,00	0,07	0,30	0,06	0,40	0,03	0,71		
	R	0,31	0,00	0,23	0,00	0,59	0,00	-0,01	0,88	0,33	0,00	0,03	0,69	0,18	0,01	-0,01	0,93		
	P,R	0,24	0,00	0,32	0,00	0,47	0,00	-0,05	0,50	0,36	0,00	0,14	0,05	0,11	0,10	0,00	0,96		
	S	-0,08	0,25	0,12	0,08	0,07	0,29	0,23	0,00	-0,50	0,00	0,05	0,50	0,27	0,00	0,21	0,00		
	P,R,S	0,09	0,21	0,28	0,00	0,29	0,00	0,11	0,12	0,00	0,99	-0,05	0,45	0,27	0,00	0,09	0,18		
Bimanual Fishing Reel + Scale	P	0,07	0,33	0,26	0,00	0,52	0,00	0,33	0,00	-0,21	0,00	0,02	0,79	0,08	0,27	0,08	0,26		
	R	-0,13	0,05	0,27	0,00	0,49	0,00	-0,01	0,91	0,13	0,07	0,04	0,55	-	-	-	-		
	P,R	0,03	0,69	0,38	0,00	0,52	0,00	0,18	0,01	0,23	0,00	0,07	0,33	-0,09	0,22	-0,04	0,56		
	S	0,05	0,45	0,20	0,00	0,37	0,00	0,13	0,05	-0,27	0,00	0,11	0,11	0,15	0,03	0,14	0,03		
	P,R,S	-0,11	0,12	0,31	0,00	0,42	0,00	0,22	0,00	0,05	0,44	-0,07	0,30	0,08	0,27	0,08	0,23		

Tabelle 4.3: Korrelationen zwischen den einzelnen unabhängigen Variablen Distanz und Manipulationsgrad (MG) und den abhängigen Variablen Zeit und erreichte Präzisionswerte (einzeln für Position, Rotation und Skalierung des Objekts) getrennt für jede Interaktionstechnik und Aufgabentyp aus der Manipulationsstudie. Es wird jeweils der Korrelationskoeffizient nach Spearman (ρ) und der p-Wert (p) angegeben. Bei der Berechnung der Korrelationen für die gemessenen Präzisionen wurden nur die Aufgaben einbezogen, die erfolgreich abgeschlossen wurden.

derlich war. Hier konnten zwischen 30 bis 50 % der Aufgaben nicht gelöst werden. Für die Testpersonen war es sehr schwer, den Controller in kreisförmigen Bahnen zu bewegen, sodass eine Drehrichtung erkannt wurde. Sie wirkten sehr schnell ungeduldig und es konnten teilweise sehr unkontrollierte und nicht zielgerichtete Bewegungen beobachtet werden. Auch die im Mittel schlechten Werte bei der Präzision bzgl. der Rotation zeigen dies. Viele Testpersonen wirkten zufrieden, wenn sie auch nur einigermaßen die richtige Drehung erreichten. Dies ist ebenfalls an den hohen Abweichungen bei den Zeitmessungen der verschiedenen Testpersonen erkennbar. Die Drehachsen wurden außerdem absolut im Raum erfasst und nicht relativ zur Testperson.

Bei der Präzision bzgl. der Position erreicht *Crank Handle* durchschnittlich ähnlich gute Werte wie die besten Techniken. Die dargestellte Kurbel schien für die Testpersonen keine große Hilfe zu sein, da sie auf höherer Entfernung laut Rückmeldungen schwer erkennbar war, weil die Größe relativ zum Objekt immer gleich blieb.

Scaled HOMER *Scaled HOMER* gehört bei Aufgaben, die ausschließlich die Positionierung erfordern, zu den langsamsten Techniken ($\bar{x}_c = 7,17s, SD_c = 4,79s$). Dies liegt

vermutlich an der skalierten Abbildungsfunktion, die hier verwendet wird. Zwar konnten damit bei schnellen Bewegungen größere Distanzen überbrückt werden, aber viele Testpersonen gaben an, dass die Bewegungen bei langsamen Bewegungen zu stark verlangsamt wurden und es dann schwierig war, das Objekt überhaupt noch zu bewegen. Bei Aufgaben, wo nur die Rotation oder die Positionierung und Rotation des Objekts auf mittlerer oder großer Distanz erforderlich war, gehörte *Scaled HOMER* im Mittel ebenfalls zu den langsamsten Techniken ($\bar{x}_c = 15,31s$, $SD_c = 6,72s$). Auf kurze Distanz lag die Technik noch im Mittelfeld ($\bar{x}_c = 9,86s$, $SD_c = 4,95s$). Die erreichte Präzision bezüglich der Position und der Rotation fällt hier ähnlich gut wie bei den besten Techniken aus. Eine Verbesserung der Präzision aufgrund der Verlangsamung von langsamen Bewegungen kann hier allerdings nicht festgestellt werden.

Allgemein lassen die Daten vermuten, dass die Zeiten sich weiter verschlechtern, sobald die Rotation von Objekten nötig ist. Grund hierfür kann sein, dass das Objekt oft erneut gegriffen werden muss, um eine größere Drehung durchzuführen. Da das Objekt mit einem Lichtstrahl ausgewählt wird, wobei der Arm meist etwas ausgestreckt ist und das Handgelenk nach vorne zeigen muss, blieb nach der Selektion oftmals wenig Spielraum, um das Objekt dann zu drehen. Die Neuausrichtung des Lichtstrahls auf das Objekt kostet ebenfalls zusätzliche Zeit. Auf kurze Distanz war es öfter möglich, seitlich auf das Objekt zu zeigen, wodurch das Handgelenk mehr Spielraum für die Drehung hatte und weshalb die Technik hier vermutlich auch besser abschneidet. Die Distanz zum Objekt scheint somit einen Einfluss auf die Zeiten zu haben, wenn die Rotation erforderlich ist ($\rho_{pr} = 0,56$, $\rho_r = 0,47$) und auch einige Timeouts traten auf größerer Entfernung auf. Häufig haben die Testpersonen das Objekt in diesen Szenarien erst nach vorne geholt, um es dort besser drehen zu können, was aber entsprechend mehr Zeit gekostet hat. Ein weiteres Problem war die bereits angesprochene mehrfache Selektion mit dem Lichtstrahl. Auf größere Distanz konnte beobachtet werden, dass die Testpersonen aufgrund der geringeren visuellen Größe des Objekts deutlich mehr Zeit benötigten, um dieses zu treffen. Der Manipulationsgrad hatte über alle Manipulationstypen hinweg einen geringeren Einfluss ($0,25 \leq \rho \leq 0,29$).

Bei einer Testperson war zu beobachten, dass diese ungewöhnlich lange für das Lösen der Aufgaben benötigte und das Objekt oft in die falsche Richtung drehte. Die Testperson merkte an, dass sich das Objekt genau andersherum drehen würde als erwartet. Dies schlägt sich in einigen Ausreißern bei den Rotationsaufgaben nieder. Teilweise unterscheiden sich die Zeiten der verschiedenen Testpersonen stark, was mit den Beobachtungen einhergeht, dass einige Testpersonen die skalierte Abbildungsfunktion besser nutzen konnten als andere.

Go-Go + PRISM Die durchschnittlichen Zeiten der *Go-Go + PRISM* Technik befinden sich bei Aufgaben, die nur die Positionierung erfordern, meist im Mittelfeld in Relation zu den Zeiten der anderen Techniken ($\bar{x}_c = 5,39s$, $SD_c = 3,56s$). Eine signifikante Korrelation zwischen dem Manipulationsgrad und den erfassten Zeiten konnte nicht festgestellt werden und die Distanz scheint sich nur geringfügig auszuwirken ($\rho_p = 0,24$). Timeouts traten in diesen Szenarien nicht auf.

Bei Aufgaben, die die Rotation des Objekts einschlossen, gehört *Go-Go + PRISM* im Mittel zu den langsameren Techniken ($\bar{x}_c = 12,07s$, $SD_c = 6,67s$) und ein Anstieg der

benötigten Zeit bei höherer Entfernung lässt sich vermuten ($\rho_{pr} = 0,35$, $\rho_r = 0,19$), ebenso wie bei einem höheren Manipulationsgrad ($\rho_{pr} = 0,38$, $\rho_r = 0,37$). Beobachtungen während der Studie zeigten, dass Drehungen auf größeren Distanzen, aufgrund des problematischen Umgreifens, für viele Testpersonen schwierig waren. Die Testpersonen mussten ihren Arm ausstrecken, um entfernte Objekt zu erreichen, und ähnlich wie bei *Scaled HOMER* erlaubt das Handgelenk anschließend keine starken Rotationen. Das Objekt wurde auch hier öfters nach vorne geholt, um es dort zu drehen, was entsprechend Zeit kostete. Die Testpersonen merkten zudem häufig das unvorhersehbare Verhalten des Cursors an, was auch in den hohen Varianzen in den Zeiten erkennbar ist. Einige Testpersonen schienen Probleme mit der Kontrolle des Cursors zu haben, was vermutlich auf die genutzte Abbildungsfunktion zurückzuführen ist. Bei Aufgaben mit Rotation traten gehäuft Timeouts auf große Entfernung auf, was die Probleme unterstreicht.

Auf kurze Distanz erreicht die Technik ähnlich gute Präzisionswerte bei der Positionierung wie die besten Techniken. Bei den Präzisionswerten bei der Rotation ist erneut eine hohe Varianz erkennbar, was ebenfalls auf die problematische Drehung von Objekten hindeuten könnte.

Scaled Scrolling World In Miniature + Scale *Scaled Scrolling World In Miniature + Scale* gehört bei den Aufgaben, wo keine Skalierung des Objekts erforderlich ist, im Mittel zu den schnellsten Techniken ($\bar{x}_c = 5,69s$, $SD_c = 4,25s$) und erreichte hier oft die besten durchschnittlichen Zeiten. Allerdings ist zu beachten, dass die Zeitmessung erst startete, sobald das Objekt gegriffen wurde. Somit konnten die Testpersonen das Miniaturmodell zuvor ohne Zeitdruck so skalieren und positionieren, dass sie die Aufgabe gut lösen konnten. In realitätsnäheren Szenarien würde die dafür benötigte Zeit somit noch dazu kommen. Dies ist auch anhand der ähnlichen Zeiten auf unterschiedlichen Distanzen und der fehlenden signifikanten Korrelationen zu erkennen. Im Gegensatz zur Selektionsstudie ist hier also keine Verschlechterung der Zeiten bei höheren Entfernungen zum Zielobjekt erkennbar, da das Miniaturmodell vor dem Start der Aufgabe entsprechend gut platziert werden konnte.

Im Allgemeinen merkten die Testpersonen Probleme mit dem Skalieren der Miniaturwelt an. Die Umsetzung der Skalierung war für einige Testperson zu sensibel und oft wurde zuerst in die falsche Richtung skaliert. Diese Probleme traten aber vor allem zwischen den Zeitmessungen beim Vorbereiten des Miniaturmodells auf.

Die Daten lassen vermuten, dass der Manipulationsgrad nur geringe Auswirkungen auf die Zeit bei den Aufgaben hatte, die nur die Positionierung des Objekts erfordern ($\rho_p = 0,15$), was vermutlich daran liegt, dass sich die zu überbrückende Distanz durch die Verkleinerung im Miniaturmodell nur noch geringfügig voneinander unterschied. Bei den Aufgaben, wo auch die Rotation von Objekten durchgeführt werden musste, ist ab einem mittleren Manipulationsgrad im Mittel allerdings eine Verschlechterung der Zeiten erkennbar. Zwischen einem mittleren und hohen Manipulationsgrad sind wieder kaum Unterschiede bei den Zeiten erkennbar. Dies führte zu etwas größeren Korrelationskoeffizienten, aber einer noch immer geringen Korrelation ($\rho_{pr} = 0,33$, $\rho_r = 0,39$). Da die Interaktion mit dem Miniaturmodell ähnlich wie die Interaktion mit der *Simple Virtual Hand* Technik funktioniert, muss hier vermutlich ebenso ab einem höheren Manipulationsgrad umgegriffen werden, was zusätzliche Zeit benötigt.

Bei Aufgaben, wo die Skalierung von Objekten erforderlich ist, lassen die Daten eine Verschlechterung der Zeiten vermuten ($\bar{x}_c = 9,63s, SD_c = 6,4s$). Hier könnte die Art und Weise, wie die Skalierung umgesetzt wurde, eine Rolle spielen. Einige Testpersonen merkten an, dass es ungewöhnlich sei, dass das Objekt indirekt skaliert wird, wenn die Welt vergrößert oder verkleinert wird. Wie bei der Skalierung der Miniaturwelt, wurde hier auch oft zuerst in die falsche Richtung skaliert. Auch scheint es problematisch, dass sich das Objekt bei der Skalierung bewegt, weil die Miniaturwelt so vergrößert und verkleinert wird, dass immer der Boden sichtbar ist. Wird also die Miniaturwelt skaliert, während das Objekt in der Hand gehalten wird, verschiebt sich auch das Objekt relativ zur Welt. Einige Testpersonen schlugen vor, das Objekt direkt zu skalieren, wenn es am Controller befestigt ist und man über das Touchpad fährt. Bei den Aufgaben, die die Skalierung des Objekts beinhalteten, ist allerdings auch wieder oft eine hohe Varianz erkennbar, was darauf hindeutet, dass die Mechanik für einige Testpersonen besser nutzbar war. Timeouts traten nur in sehr wenigen Fällen auf. Der Manipulationsgrad hat erneut eine geringe Auswirkung auf die Zeiten ($\rho_{prs} = 0,36, \rho_s = 0,16$).

Die erfassten Werte für die erreichte Präzision bei der Positionierung und Rotation von Objekten lassen einen merklichen Nachteil der *Scaled Scrolling World In Miniature + Scale* Technik vermuten. Schon auf geringer Distanz erreicht die Technik im Mittel die mit Abstand schlechtesten Werte, unabhängig vom Aufgabentyp. Über alle gemessenen Präzisionswerte und Manipulationstypen lässt sich kaum eine signifikante Korrelation bestimmen. Durch die verkleinerte Darstellung im Miniaturmodell scheint es schwer möglich, eine hohe Präzision zu erreichen. Kleinere Abweichungen im Miniaturmodell können große Auswirkungen auf die eigentlichen Objekte haben. Eine sehr hohe Skalierungsstufe könnte dem zum Teil entgegenwirken, aber dies konnte bei kaum einer Testpersonen beobachtet werden und das Miniaturmodell kann auch nicht unbegrenzt vergrößert werden. Ähnlich sieht es bei der Präzision der Skalierung aus. Hier ist es aber schwer, Unterschiede zwischen den Techniken auszumachen. Die im Durchschnitt fast durchgängig unveränderte Objektgröße in allen Aufgaben, in denen keine Skalierung nötig war, weist allerdings darauf hin, dass die Skalierung gut von der Rotation und Positionierung eines Objekts abgegrenzt ist. Die wenigen Ausreißer kamen vermutlich zustande, weil einige Testpersonen die Miniaturwelt versehentlich skalierten, während sie das Objekt in der Hand hielten, obwohl sie nicht beabsichtigten, die Größe des Objekts zu ändern.

Scaled HOMER + Scale Ähnlich wie bei *Scaled HOMER* lassen die Daten bei *Scaled HOMER + Scale* im Mittel langsamere Zeiten bei Aufgaben, die nur die Positionierung des Objekts erfordern, vermuten ($\bar{x}_c = 6,08s, SD_c = 4,94s$) als bei den anderen Techniken. Dies war zu erwarten, da die Techniken hier gleich funktionieren. Die Testpersonen merkten erneut an, dass die Skalierung der Abbildungsfunktion bei langsamen Bewegungen zu stark sei.

Bei Aufgaben, wo das Objekt rotiert, aber nicht skaliert werden musste, zählt die Technik dagegen im Mittel zu den schnellsten ($\bar{x}_c = 10,24s, SD_c = 5,52s$). Nur *Simple Virtual Hand* und *Scaled Scrolling World In Miniature + Scale* waren im Durchschnitt meist ähnlich schnell oder schneller. Der direkte Vergleich mit *Scaled HOMER* lässt vermuten, dass *Scaled HOMER + Scale* hier besser abschneidet. Dies könnte darauf hindeuten, dass die Verstärkung von Drehbewegungen vorteilhaft ist. Die etwas schlechteren Zeiten auf größter Distanz ($\rho_{pr} = 0,24, \rho_r = 0,31$) und Beobachtungen während der Studie weisen al-

lerdings darauf hin, dass wie bei *Scaled HOMER* auch hier Objekte für größere Rotationen erneut ausgewählt werden müssen und die mehrfache Selektion von entfernten Objekten Probleme bereitet. Darüber hinaus deutet die größere Varianz in den Daten darauf hin, dass die Testpersonen hier teilweise größere Probleme hatten.

Eine Stärke der Technik lässt sich bei den Aufgaben vermuten, die nur die Skalierung des Objekts erfordern. Die hier erreichten Zeiten sind sehr gut ($\bar{x}_c = 2,2s$, $SD_c = 1,73s$), weisen eine geringe Varianz auf und sind im Mittel deutlich besser als die der anderen Techniken, unabhängig von der Distanz und dem Manipulationsgrad, wofür keine signifikante Korrelation festgestellt werden konnte. Dies liegt vermutlich an der Art der Skalierung durch das simple Auseinander- und Zusammenführen der Hände und daran, dass sich die Position des Objekts durch die skalierte Abbildungsfunktion kaum bewegte, wenn die dominante Hand einigermaßen ruhig gehalten wurde. Die erreichten Präzisionswerte bzgl. der Position und der Rotation lassen außerdem vermuten, dass durch die verwendeten skalierten Abbildungsfunktionen die beiden Eigenschaften relativ konstant gehalten werden konnten. Sobald zusätzlich die Positionierung und die Rotation des Objekts erforderlich sind, wird die Technik, aufgrund der bereits genannten Probleme, merklich langsamer ($\bar{x}_c = 10,72s$, $SD_c = 5,55s$) und auch die Präzisionen bzgl. der Position und der Rotation verschlechtern sich. Dennoch zählt *Scaled HOMER + Scale* hier im Mittel zu den schnellsten Techniken.

Eine Testperson merkte erneut Probleme mit der indirekten Rotation des Objekts an. Dies kann einige Ausreißer in den Daten erklären. Timeouts gab es dagegen nur wenige.

Die gemessenen Präzisionswerte für die Rotation und Position sind bei Aufgaben auf kurzer Distanz, wo die Positionierung und/oder die Rotation erforderlich ist, im Mittel ähnlich gut wie die der meisten Techniken. Hier sind somit keine positiven oder negativen Auswirkungen der Skalierungsfunktionen erkennbar. Die erreichte Präzision der Skalierung lässt erneut einen Vorteil der verschiedenen Modi vermuten. Bis auf einige wenige Ausreißer ändert sich die Skalierung nicht, wenn diese nicht von den Aufgaben gefordert war. Das lag daran, dass nur skaliert werden könnte, wenn der zweite Controller mit hinzugenommen wurde. Die Ausreißer entstanden in Fällen, wo die Testpersonen annahmen, dass das Objekt skaliert werden musste, obwohl dies nicht der Fall war.

Bimanual Fishing Reel + Scale *Bimanual Fishing Reel + Scale* gehört bei Aufgaben, die nur die Positionierung erfordern, im Mittel zu den schnellsten Techniken ($\bar{x}_c = 5,09s$, $SD_c = 4,57s$). Nur auf größter Distanz und höchstem Manipulationsgrad ist die durchschnittliche Zeit die schlechteste unter allen Techniken ($\bar{x} = 10,21s$, $SD = 6,89$) bei einer hohen Varianz. Dies kann daran liegen, dass die Objekte hier auch auf der z-Achse verschoben werden mussten, was für viele Testpersonen nicht durch reine Bewegung der Hand möglich war und viele auf die Verwendung des Touchpads zurückgriffen, um Objekte auf dieser Achse zu bewegen. Dies hat entsprechend mehr Zeit gekostet.

Aufgaben, die die Rotation von Objekten erfordern, scheinen für die Testpersonen mit dieser Technik unterschiedlich schwer gewesen zu sein. Darauf weisen die hohen Varianzen hin, die in den Zeiten erkennbar sind ($\bar{x}_c = 12,91s$, $SD_c = 7,09s$), und die Mittelwerte befinden sich meist im Mittelfeld oder nur *Crank Handle* war langsamer. Einige Testpersonen merkten wieder Probleme mit der indirekten Drehung an. Diese war auch

nach längerer Übung für viele schwierig umzusetzen. Einige versuchten, das Objekt so zu drehen, als wenn sie mit dem Controller eine Stelle des Objekts fixieren und durch Positionsveränderungen des Controllers das Objekt bewegen. Andere meinten, dass sich das Objekt andersherum bewegt, als sie es erwarten würden. Sobald die Rotation hinzukam, traten merklich mehr Timeouts auf. In anderen Szenarien traten diese kaum auf.

Bei Aufgaben, wo das Objekt nur skaliert werden musste, erreichte die Technik im Mittel gute Zeiten ($\bar{x}_c = 6,08s$, $SD_c = 3,85s$), gehörte aber zu den langsamsten Techniken. Wenn alle Aufgaben durchgeführt werden mussten, war *Bimanual Fishing Reel + Scale* im Mittel durchgängig die langsamste Technik ($\bar{x}_c = 16,29s$, $SD_c = 7,04s$). Dies kann neben den bereits genannten Problemen daran liegen, dass die Testpersonen öfters die Buttons für die unterschiedlichen Funktionen verwechselten.

Für keinen Manipulationstypen konnte eine signifikante Korrelation mit den erfassten Zeiten festgestellt werden, was vermutlich an den bereits angesprochenen hohen Varianzen lag. Der Manipulationsgrad weist eine geringe Korrelation mit den erfassten Zeiten für alle Manipulationstypen auf ($0,2 \leq \rho \leq 0,38$).

Die Präzision für die Position war auf kurzer Distanz, wie bei den meisten Techniken, im Mittel sehr gut. Auf größere Distanzen lassen die Daten eine merkliche Verschlechterung der Präzision bzgl. der Position vermuten. Während der Studie konnte zudem beobachtet werden, dass die Platzierung mit dem Lichtstrahl nicht sehr genau möglich war und beim Drücken des Buttons zum Loslassen des Objekts sich die Position oft etwas veränderte, was auch von einigen wenigen Testpersonen angemerkt wurde. Auf größerer Distanz ist hier aber, wie bereits angesprochen, bei allen Techniken eine hohe Varianz erkennbar, weshalb keine zuverlässige Aussage getroffen werden kann.

Bei Aufgaben, wo die Rotation des Objekts nicht nötig ist, weicht die finale Rotation nur selten von der Zielrotation ab, was vermutlich wieder auf die Separierung der Aufgabentypen durch die Technik zurückzuführen ist. Bei der Präzision für die Objektgröße bei Aufgaben, die keine Skalierung erforderten, verhält sich dies ähnlich. Ist die Skalierung des Objekts nötig, werden bei der Präzision bzgl. der Objektgröße im Mittel ähnlich gute Werte wie bei den anderen Techniken erreicht.

Fragebögen

Abbildung 4.29 zeigt die Ergebnisse des System Usability Scales, und in Abbildung 4.30 sind die Ergebnisse des NASA Task Load Index visualisiert. Abbildung 4.31 stellt die Ergebnisse der dedizierten Fragen bzgl. Spaß, Natürlichkeit, Präzision und Geschwindigkeit dar. Die Mittelwerte und die dazugehörigen Standardabweichungen sind in Anhang A.8.2 dargestellt. Im Folgenden werden die einzelnen subjektiv erfassten Aspekte in Bezug zu den Techniken gesetzt.

Simple Virtual Hand Die guten objektiv gemessenen Werte spiegeln sich auch in den Ergebnissen der Fragebögen wider. Der erreichte durchschnittliche Usability-Wert ($\bar{x} = 95,83$, $SD = 7,02$) ist der beste unter allen Techniken, bei einer geringen Varianz. Dies ist vermutlich auf die sehr geringe Einarbeitungszeit, die von den Testpersonen benö-

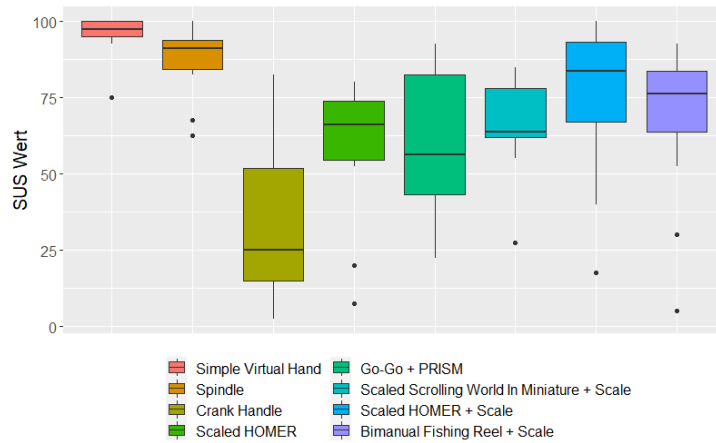


Abbildung 4.29: Ergebnisse des System Usability Scales aus der Manipulationsstudie.

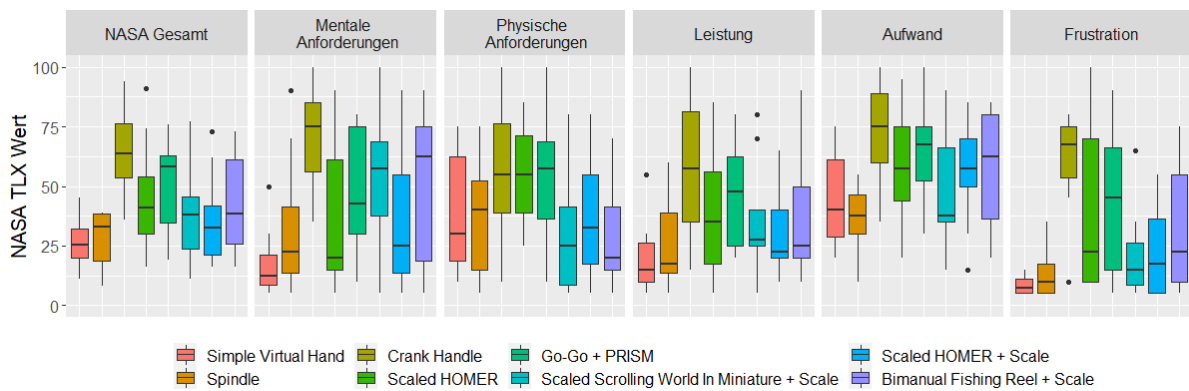


Abbildung 4.30: Ergebnisse des NASA Task Load Index aus der Manipulationsstudie.

tigt wurde, und die sehr intuitiv erscheinende Kontrolle des virtuellen Cursors zurückzuführen. Hierauf lässt sich wahrscheinlich auch die als sehr hoch eingeschätzte Natürlichkeit ($\bar{x} = 4,33, SD = 0,98$) zurückführen. Zudem zählen die Bewertungen der gefühlte Präzision ($\bar{x} = 4,25, SD = 0,97$) und Geschwindigkeit ($\bar{x} = 4,67, SD = 0,49$) sowie des Spaßfaktors ($\bar{x} = 4,17, SD = 0,94$) zu den besten aller Techniken. Einige Testpersonen merkten allerdings an, dass sie gerne beide Hände benutzt hätten.

Die gefühlte Arbeitslast ($\bar{x} = 25,83, SD = 9,87$) wird im Durchschnitt als sehr gering im Vergleich zu anderen Techniken eingeschätzt. Bei den physischen Anforderungen ($\bar{x} = 39,58, SD = 25,36$) und dem allgemeinen Aufwand ($\bar{x} = 43,33, SD = 19,69$) gab es eine hohe Varianz und hier wurden im Mittel etwas höhere Werte erreicht, was vermutlich an den vielen Bewegungen mit der Hand und dem Arm lag. Andere Techniken schnitten hier aber schlechter ab.

Spindle Die Usability ($\bar{x} = 87,71, SD = 11,89$) der Technik wurde im Mittel als sehr gut eingeschätzt. Auch hier sind vermutlich die geringe Einarbeitungszeit und die intuitive Nutzbarkeit Gründe für diese gute Bewertung. Insbesondere die Art der Skalierung von Objekten wurde als sehr angenehm bezeichnet. Auch bei der empfundenen Arbeitslast ($\bar{x} = 28,92, SD = 11,07$) zählt *Spindle* im Middle zu den am besten bewerteten Techniken und erhielt in den Teilaspekten ähnliche Bewertungen wie *Simple Virtual Hand*.

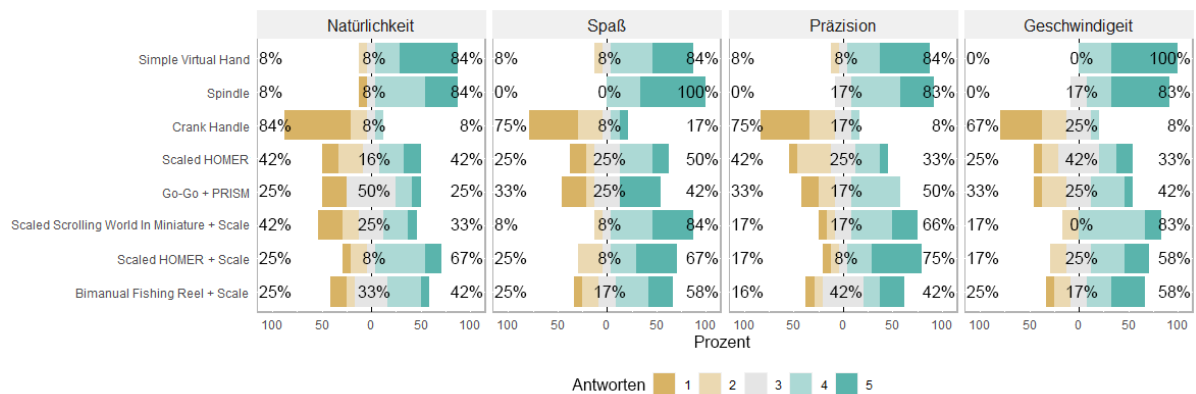


Abbildung 4.31: Ergebnisse der Fragen bzgl. Spaß, Natürlichkeit, Präzision und Geschwindigkeit aus der Selektionsstudie.

Beim Spaßfaktor ($\bar{x} = 4,67, SD = 0,49$) erhielt *Spindle* von allen Techniken die meisten positiven Bewertungen. Interessanterweise wurden auch die gefühlte Geschwindigkeit ($\bar{x} = 4,42, SD = 0,79$) und Präzision ($\bar{x} = 4,17, SD = 0,72$) als sehr hoch eingeschätzt, obwohl die Technik in einigen Szenarien zu den langsamsten gehört und auch die Skalierung nicht konstant gehalten werden kann. Die guten Bewertungen hier sind aber vermutlich darauf zurückzuführen, dass die Technik nur auf kurze Distanz verwendet werden konnte und viele der anderen Techniken auf größere Distanzen merklich langsamer und unpräziser funktionierten.

Crank Handle Die bereits genannten Probleme führten vermutlich zu den schlechten Bewertungen bei der Usability ($\bar{x} = 32,71, SD = 24,23$), was *Crank Handle* hier im Mittel zu der mit Abstand schlechtesten bewerteten Technik macht. Auch die Arbeitslast ($\bar{x} = 64,17, SD = 17,64$) wurde als sehr hoch eingeschätzt und gehört in den Teilaspekten im Mittel zu den am schlechtesten bewerteten Techniken. Beim Spaßfaktor ($\bar{x} = 2,0, SD = 1,35$) gab es entsprechend viele negative Bewertungen. Ebenso negativ wurden die subjektive Präzision ($\bar{x} = 1,83, SD = 1,03$) und Geschwindigkeit ($\bar{x} = 2,0, SD = 1,04$) bewertet. Auch wenn das Drehen einer Kurbel aus der realen Welt bekannt sein sollte, wurde die Technik als sehr unnatürlich ($\bar{x} = 1,58, SD = 1,0$) eingeschätzt. Hier haben sich die genannten Probleme vermutlich stark ausgewirkt.

Scaled HOMER Die genannten Probleme mit der stark skalierten Abbildungsfunktion und der schwierigen Rotation von Objekten führten vermutlich zu der im Mittel geringeren Usability-Wertung ($\bar{x} = 58,96, SD = 23,02$) im Vergleich zu den meisten anderen Techniken. Den Spaßfaktor ($\bar{x} = 3,25, SD = 1,36$) schätzten die meisten Testpersonen noch positiv ein, aber auch hier gab es bereits einige negative und neutrale Bewertungen. Die Natürlichkeit ($\bar{x} = 3,0, SD = 1,41$), Präzision ($\bar{x} = 2,92, SD = 1,16$) und Geschwindigkeit ($\bar{x} = 3,17, SD = 1,19$) der Technik wurden ebenfalls eher durchschnittlich bewertet. Die subjektiven Bewertungen, die über das komplette Spektrum der Antwortmöglichkeiten gestreut sind, lassen erneut die Vermutung zu, dass sich die Nutzbarkeit für viele Testpersonen stark unterschied.

Ein ähnliches Bild zeigt die Einschätzung der gefühlten Arbeitslast ($\bar{x} = 45,83, SD = 21,52$). Hier liegt die Technik im Mittelfeld, aber die Antworten zeigen eine hohe Varianz. So werden der mentale Aufwand ($\bar{x} = 36,25, SD = 29,86$) und die Frustration ($\bar{x} = 40,83, SD = 35,02$) im Mittel noch als durchschnittlich eingeschätzt, aber auch hier sind hohe Abweichungen zwischen den Testpersonen erkennbar. Die physischen Anforderungen ($\bar{x} = 55,0, SD = 20,11$) und der Aufwand ($\bar{x} = 59,58, SD = 23,3$) werden im Mittel eher höher eingeschätzt, was vermutlich an den vielen Drehungen mit dem Handgelenk lag. Einige Testpersonen gaben an, dass das Handgelenk dabei schnell ermüdete.

Go-Go + PRISM Auch bei *Go-Go + PRISM* hatten die genannten Probleme vermutlich einen Einfluss auf die Usability ($\bar{x} = 59,17, SD = 25,05$). So sind auch hier große Abweichungen zwischen den Testpersonen erkennbar. Dies setzt sich bei den insgesamt durchschnittlichen Bewertung zum Spaßfaktor ($\bar{x} = 3,25, SD = 1,71$), der Natürlichkeit ($\bar{x} = 2,83, SD = 1,27$), der subjektiven Präzision ($\bar{x} = 3,0, SD = 1,21$) und der empfundenen Geschwindigkeit ($\bar{x} = 3,08, SD = 1,16$) fort, wo meist das komplette Spektrum der möglichen Antworten auftritt. Auch die induzierte Arbeitslast ($\bar{x} = 51,25, SD = 18,51$) wird als die zweitschlechteste unter allen Techniken bewertet. Insbesondere die physischen Anforderungen ($\bar{x} = 54,58, SD = 26,75$) und der Aufwand ($\bar{x} = 65,0, SD = 19,31$) werden als hoch eingeschätzt, was sich mit den beschriebenen Problemen und Beobachtungen deckt. Die Unzufriedenheit einiger Testpersonen drückt sich in den hohen Werten der Frustration ($\bar{x} = 42,92, SD = 30,93$). Die durchgängig hohen Varianzen lassen auch hier wieder vermuten, dass es sehr von der Testperson abhing, wie gut die skalierte Abbildungsfunktion genutzt werden konnte.

Scaled Scrolling World In Miniature + Scale Im Mittel wurde die Usability ($\bar{x} = 65,83, SD = 15,53$) von *Scaled Scrolling World In Miniature + Scale* schlechter als bei den meisten anderen Techniken eingeschätzt. Dies ist vermutlich auf die umständliche Skalierung und Komplexität der Technik zurückzuführen. Meist wurde die volle Übungszeit genutzt, um sich mit der Technik vertraut zu machen. Einige Testpersonen merkten allerdings an, dass sie es gut fanden, dass man zwei Hände nutzen konnte. Viele Testpersonen nutzten das Miniaturmodell, um die Lösung der Aufgaben vorausplanen und unabhängig von der Distanz die Objekte aus verschiedenen Blickwinkeln betrachten zu können. Auch das Umgreifen bei aufwändigeren Drehungen schien durch die Nutzung beider Hände einfacher. Einige Testpersonen merkten an, dass sie echte Objekte störend fanden, da sie auf kurze Distanz manchmal in das Miniaturmodell ragten. Auch konnte beobachtet werden, dass einige wenige Testpersonen bei der Interaktion mit dem Miniaturmodell mit den Controllern zusammenstießen oder mit dem Controller gegen das Headset stießen, was sich ebenfalls negativ auf die Usability ausgewirkt haben könnte.

Die Arbeitslast ($\bar{x} = 37,42, SD = 17,7$) wurde als eher gering eingeschätzt, befindet sich bezüglich aller Techniken aber im Mittelfeld. Insbesondere die mentalen Anforderungen ($\bar{x} = 54,58, SD = 26,92$) wurden vermutlich aufgrund der Komplexität der Technik als im Mittel höher eingeschätzt. Unerwartet ist der geringe Mittelwert bei den physischen Anforderungen ($\bar{x} = 28,33, SD = 23,77$) im Vergleich zu den anderen Techniken, obwohl beide Hände verwendet wurden. Es konnte aber beobachtet werden, dass die Arme oft in einer komfortablen Position gehalten und angewinkelt werden konnten, was die Werte erklären könnte.

Der Spaßfaktor ($\bar{x} = 4,17, SD = 0,94$) erreicht einen der höchsten Werte von allen Techniken. Dies liegt vermutlich, wie bei der Selektionsstudie, an der Neuheit der Technik, was auch von einigen Testpersonen kommuniziert wurde. Die Natürlichkeit ($\bar{x} = 2,75, SD = 1,36$) wird dagegen als eher gering eingeschätzt. Die Mehrzahl der Testpersonen bewertete die Präzision ($\bar{x} = 3,67, SD = 1,23$) als gut oder sehr gut, was vermutlich auf die direkte Art der Manipulation zurückzuführen ist und im Miniaturmodell die Aufgaben augenscheinlich auch präzise gelöst werden konnten. Einige wenige Testpersonen empfanden die Präzision wahrscheinlich aufgrund der kleineren Darstellung im Miniaturmodell aber als unzureichend. Die Geschwindigkeit ($\bar{x} = 3,83, SD = 0,94$) der Technik wurde im Mittel als eine der besten bewertet. Der zusätzliche Zeitaufwand beim Positionieren und Skalieren des Miniaturmodells hatte hier also kaum negativen Einfluss.

Scaled HOMER + Scale Die durchschnittliche Bewertung der Usability zählt zu den besten aller Techniken ($\bar{x} = 75,0, SD = 25,25$), wobei die Meinungen hier teilweise stark voneinander abwichen. Die Arbeitslast ($\bar{x} = 35,92, SD = 17,75$) wird als vergleichsweise gering eingeschätzt, aber auch hier gibt es größere Abweichungen zwischen den Teilnehmenden bei den einzelnen Teilaspekten. Der Spaßfaktor ($\bar{x} = 3,83, SD = 1,27$) wird von vielen Testpersonen als positiv eingeschätzt. Auch die Natürlichkeit ($\bar{x} = 3,5, SD = 1,24$) wird unerwartet hoch eingeschätzt. Dies ist aber anscheinend stark abhängig von der jeweiligen Testperson, weil hier alle möglichen Bewertungen der Skala vertreten sind. Die erreichte Präzision ($\bar{x} = 4,0, SD = 1,35$) wird ebenfalls als relativ hoch eingeschätzt, was darauf hindeutet, dass die Skalierungsfunktion der Rotation gefühlt einen positiven Effekt hat. Auch die Geschwindigkeit ($\bar{x} = 3,67, SD = 1,07$) wird vorrangig als positiv eingeschätzt. Insgesamt schnitt die Technik demnach bei den subjektiven Kriterien besser ab als *Scaled HOMER*, wobei die starke Skalierungsfunktion bei der Positionierung vermutlich auch hier für einige abweichende Bewertungen sorgte.

Bimanual Fishing Reel + Scale Trotz der bereits besprochenen Probleme bei der *Bimanual Fishing Reel + Scale* Technik wurde die Usability ($\bar{x} = 67,08, SD = 26,02$) im Durchschnitt besser als bei den meisten anderen Techniken eingeschätzt, wobei es merkliche Ausreißer hin zum Negativen gab.

Die durchschnittliche induzierte Arbeitslast ($\bar{x} = 41,58, SD = 20,22$) befindet sich im Mittelfeld aller Techniken. Insbesondere die mentalen Anforderungen ($\bar{x} = 52,5, SD = 29,96$) und der Aufwand ($\bar{x} = 55,42, SD = 24,63$) wurden hoch eingeschätzt, was vermutlich an der Verwendung mehrerer Buttons lag. Da die Arme in einer komfortablen Position gehalten werden konnten und auch mehr Spielraum für Drehungen als bei anderen Techniken vorhanden war, wurden die physischen Anforderungen ($\bar{x} = 28,75, SD = 19,79$) und der allgemeine Aufwand ($\bar{x} = 55,42, SD = 24,63$) vermutlich als eher gering bewertet. Zudem musste der Arm durch die Verwendung von Buttons weniger bewegt werden. Entsprechend ist auch die Frustration ($\bar{x} = 32,5, SD = 27,59$) im Mittel gering und die Bewertung der eigenen Leistung ($\bar{x} = 38,75, SD = 26,47$) eher gut.

Der Spaß ($\bar{x} = 3,5, SD = 1,31$) wurde von vielen Testpersonen positiv bewertet, aber es gibt auch einige negative Abweichungen. Hier können sich wieder die Komplexität und das indirekte Drehen ausgewirkt haben. Auch bei der Natürlichkeit ($\bar{x} = 3,08, SD = 1,24$) wurden viele negative und neutrale Bewertungen vergeben, was vermutlich auch

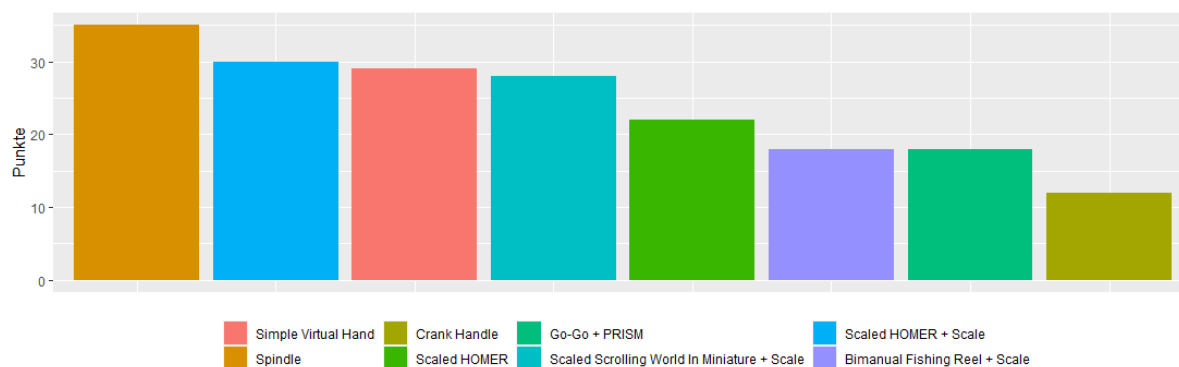


Abbildung 4.32: Aggregierte Sortierung der Techniken durch die Testpersonen der Manipulationsstudie.

hier an der Verwendung von mehreren Buttons liegt. Weiterhin erhielten die Präzision ($\bar{x} = 3,42$, $SD = 1,24$) und die Geschwindigkeit ($\bar{x} = 3,58$, $SD = 1,38$) vermehrt negative und neutrale Bewertungen. Insgesamt ist also auch bei dieser Technik eine hohe Varianz in den Bewertungen erkennbar, was darauf hindeutet, dass die vielen Buttons und Modi unterschiedlich gut von den Testpersonen angenommen wurden.

Sortierung der Techniken

Abbildung 4.32 zeigt die Sortierung der Manipulationstechniken anhand der Präferenzen der Testpersonen. Da von jeder Testperson drei Techniken getestet wurden, konnten drei Punkte für den ersten Platz, zwei Punkte für den zweiten Platz, und ein Punkt für den dritten Platz vergeben werden.

In der Selektionsstudie lag *Spindle* noch auf dem vorletzten Platz, erreicht hier aber den ersten Platz. Für die Manipulation eignet sich diese Technik durch ihre natürliche Art der Interaktion vermutlich sehr viel besser als für die ausschließliche Selektion. Zu beachten ist aber, dass die Technik nur auf kurze Distanz eingesetzt werden konnte. *Scaled HOMER + Scale* liegt auf dem zweiten Platz, obwohl es Probleme mit einer zu starken Verlangsamung von langsamen Bewegungen gab. Die Kommentare der Testpersonen deuten allerdings darauf hin, dass die Technik insgesamt einen guten Kompromiss aus Nutzerfreundlichkeit und Ausdrucksstärke bietet. Damit liegt die Technik sogar vor *Simple Virtual Hand*, die zwar eine der intuitivsten Techniken ist, sich aber einige Testpersonen die Nutzung der zweiten Hand wünschten und den geringen Funktionsumfang bemängelten. *Scaled Scrolling World In Miniature + Scale* liegt erneut unerwartet weit vorn, was vermutlich ebenfalls an der Unterstützung aller Aufgaben und der Neuartigkeit der Technik liegt. Etwas weiter abgeschlagen sind *Scaled HOMER*, *Bimanual Fishing Reel + Scale* und *Go-Go + PRISM*. Dies war zu erwarten, da die Techniken mit einigen Problemen zu kämpfen hatten. Ebenfalls erwartbar ist der letzte Platz von der *Crank Handle* Technik, mit der kaum eine Testperson gut zurechtkam.

4.6 Diskussion

Die Studie liefert aufschlussreiche Ergebnisse, auf die zukünftige Forschung im Bereich der 3D-Interaktion aufbauen kann. Im Folgenden sollen die Resultate der beiden Teilstudien aufgegriffen werden, um über auffällige Aspekte im Detail zu diskutieren. Dabei sollen technikübergreifend Rückschlüsse auf die Taxonomie gezogen und existierende Studien mit den hier erreichten Ergebnissen in Bezug gesetzt werden. Hierbei werden bereits mögliche Untersuchungsgegenstände für weiterführende Studien formuliert, die in der darauffolgenden Hypothesengenerierung aufgegriffen werden.

4.6.1 Disambiguierung

In der Studie hat sich die wichtige Rolle der Disambiguierung gezeigt. So gehörten in der Teilstudie zur Selektion *IntenSelect* und *Flashlight*, die verhaltensbasierte bzw. heuristische Disambiguierung verwenden, im Mittel in allen Szenarien zu den schnellsten Techniken. Die beiden Techniken erreichten dabei ähnliche Zeiten und eine ähnliche Anzahl an fehlerhaften Selektionen. Erwartbar wäre gewesen, dass *IntenSelect* besser die ungewollten Sprünge auf andere Objekte kurz vor der Selektion (siehe Kapitel 4.5.1) abfängt, weil hier auch das Verhalten der Nutzenden vor der tatsächlichen Auswahl in die Bestimmung des Zielobjekts einfließt. Dies war hier nicht zu beobachten, wobei eine Anpassung der entsprechenden von der Technik genutzten Parameter eventuell einen positiven Effekt haben könnte. In der Arbeit der Autoren von *IntenSelect* (De Haan et al., 2005) wurden leider keine konkreten Angaben dazu gemacht, wie stark das vorhergehende Verhalten und aktuelle Werte in die Berechnung bestenfalls einfließen sollen. Hier wäre eine dedizierte Studie nötig, um die Parameter entsprechend zu bestimmen.

Die gemessenen Zeiten deuten darauf hin, dass *IntenSelect* und *Flashlight* in Szenarien mit einer kleinen visuellen Objektgröße und hoher Objektdichte langsamer werden. Nun könnte man die Vermutung äußern, dass ab einer bestimmten Objektdichte mehr Zeit benötigt wird, um kleine Objekte zu selektieren, als mit Techniken, die eine mehrstufige Disambiguierung verwenden (wie z.B. *Expand*), auch wenn diese einen erhöhten Zeitaufwand durch die zusätzlichen Schritte mit sich bringen. Dem widersprechen allerdings die Ergebnisse einer Studie von Cashion et al. (2013) in der *Bendcast*, eine Technik, die ähnlich wie *IntenSelect* funktioniert, und *Expand* verglichen wurden. Dabei wurde insbesondere die Objektdichte variiert. Auch hier nehmen die Zeiten von *Expand* mit höherer Objektdichte zu, da vermutlich auch in der zweiten Phase das Zielobjekt erst unter mehreren gefunden werden muss.

Bei den Techniken *Scaled HOMER* und *Bimanual Fishing Reel + Scale*, die keine Disambiguierung nutzen, lassen die Daten insbesondere in Szenarien Probleme vermuten, in denen Objekte mit kleiner visueller Größe selektiert werden müssen. Beobachtungen zeigten, dass es stark von der Testperson abhing, wie genau der Lichtstrahl ausgerichtet werden konnte, was vermutlich auf den natürlichen Tremor zurückzuführen ist. Auch der Heisenberg Effekt, bei dem der Lichtstrahl aufgrund des Drückens des Buttons zum Auslösen der Selektion bewegt wird, konnte beobachtet werden und wurde so auch von einigen wenigen Testpersonen beschrieben. In der Studie war ein ähnlicher Effekt zu erkennen,

wie ihn Kopper et al. (2011) beschreiben, wo solche unmittelbar auslösenden Techniken eine sehr präzise Interaktion erfordern, was wiederum in höhere Ausführungszeiten und mehr fehlerhafte Selektionen resultierte. Als Alternative werden Techniken mit manueller Disambiguierung vorgeschlagen, wie die auch in dieser Studie getestete *Expand* Technik. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Verwendung dieser Technik die Anzahl der Fehler tatsächlich stark reduziert, dafür aber, wie bereits angesprochen, mehr Zeit aufgrund der mehrstufigen Selektion benötigt wird. Die zusätzlich benötigte Zeit war vor allem in Szenarien sichtbar, wo das Zielobjekt für andere Techniken noch groß genug war, um es komfortabel mit einem Lichtstrahl zu selektieren. Bei sehr kleinen Objekten legen die erreichten Zeiten allerdings nahe, dass eine manuelle mehrstufige Disambiguierung schneller sein kann, als wenn ein präzise und unmittelbar auslösende Selektion verwendet wird. Dies deckt sich mit anderen Studien wo ebenfalls Techniken mit mehrstufiger Disambiguierung überprüft wurden (siehe z.B. Cashion et al. (2012, 2013); Kopper et al. (2011)).

Die Disambiguierung könnte die Präzision bei anderen in der Studie verwendeten Techniken erhöhen, was in weiterführenden Studien überprüft werden könnte. Wie bereits in Kapitel 4.5.1 beschrieben, sorgten bei der *Simple Virtual Hand* Technik die versetzte graue Kugel vor dem Controller und der längere Weg des Triggers vermutlich für eine geringe Anzahl an Fehlern und eine geringfügig schlechtere gefühlte Präzision. Ein simpler Disambiguierungsmechanismus, wie ihn z.B. VOTE (Moore et al., 2018) nutzt, könnte das Problem bereits verhindern. Dabei werden innerhalb eines bestimmten Zeitfensters alle durch den Cursor berührten Objekte in einer Liste gespeichert und beim Auslösen der Selektion das Objekt ausgewählt, welches am häufigsten in dieser Liste auftritt. In der Manipulationsstudie war ebenfalls zu beobachten, dass die erneute Selektion von Objekten auf größerer Distanz bei den *Scaled HOMER* Techniken bei kleinen Objekten zusätzliche Zeit kostete, wobei eine Disambiguierung wie bei *IntenSelect* hätte unterstützen können.

4.6.2 Separierung der Transformationen

Eine partielle Separierung der Transformationen zeigte in dieser Studie positive Auswirkungen. Mit *Spindle*, wo Positionierung, Rotation und Skalierung gleichzeitig durchgeführt wird, war es z.B. schwierig, die Objektgröße unverändert zu lassen, wenn eine Skalierung des Objekts nicht erforderlich war. *Bimanual Fishing Reel + Scale*, *Scaled HOMER + Scale* und *Scaled Scrolling World In Miniature + Scale* hatten hier weniger Probleme, da diese einen getrennten Modus für die Skalierung nutzen. Ein Button zur Aktivierung des Skalierungsmodus, wie es auch Cho und Wartell (2015) für die *Spindle + Wheel* Technik vorschlugen, hätte hier vermutlich geholfen.

Auch bei *Crank Handle* und *Bimanual Fishing Reel + Scale* sorgten die verschiedenen Modi für die Rotation und Positionierung dafür, dass die Rotation in den meisten Fällen unverändert blieb, wenn nur die Positionierung erforderlich war. Die Ergebnisse der *Crank Handle* Technik lassen aber vermuten, dass diese Modi eindeutig abgegrenzt sein müssen, sodass zwischen diesen nicht versehentlich gewechselt wird. Da bei der Technik der Rotationsmodus aktiviert wird, wenn der Trigger innerhalb eines Zeitfensters erneut gedrückt wird, hatten viele Testpersonen Probleme, wenn sie Objekte über eine größere Distanz bewegen mussten. Dann wurde oft versehentlich in den Rotationsmodus gewechselt, ob-

wohl eigentlich beabsichtigt war, das Objekt neu zu greifen, um es weiter verschieben zu können.

Die komplette Separierung der Rotationsachsen hat bei *Crank Handle* nicht gut funktioniert. In der Literatur gibt es gegensätzliche Meinungen bezüglich einer derartigen Separierung bei der Rotation von Objekten. Nach M. Chen et al. (1988) und Jacob et al. (1993) ist der schnellste und intuitivste Weg, die Achsen nicht zu separieren. Veit et al. (2009) fanden dagegen heraus, dass die Dekomposition der Achsen nicht zwangsläufig präziser, aber schneller sein kann. Auch Parsons (1995) zeigt, dass es für Menschen sehr schwer ist, die korrekte Rotation herzuleiten, was auch in der hier vorgestellten Studie bei einigen Testpersonen beobachtet werden konnte. Im Allgemeinen wurde aber in mehreren Studien gezeigt, dass die Reduzierung der Freiheitsgrade bei der Rotation oder Positionierung von Vorteil sein kann (siehe z.B. Mendes et al. (2016); Veit et al. (2009)). In der hier vorgestellten Studie fiel es den Testpersonen vor allem schwer eindeutige Kreisbewegungen durchzuführen, um so ein Objekt getrennt auf einer der drei primären Achsen zu drehen. Die Studie kann demzufolge nicht genutzt werden, um Indizien für Vor- und Nachteile von der Reduzierung der möglichen Freiheitsgrade abzuleiten.

Bossavit et al. (2014) haben *Crank Handle* mit den Techniken *Handle Bar* und *Grasping Objects* verglichen. *Grasping Objects* ermöglicht es, Objekte in getrennten Modi zu rotieren oder zu positionieren. *Handle Bar* wurde in der Studie so umgesetzt, dass sie entweder die gleichzeitige Positionierung und Rotation eines Objekts ermöglicht oder ausschließlich die Rotation. In den durchzuführenden Aufgaben musste ein Tetraeder so positioniert und gedreht werden, dass dieser in eine transparente Version des Tetraeders passt, was sehr den Aufgaben der hier vorgestellten Studie ähnelt. Überraschend schneidet *Crank Handle* dort ähnlich gut ab wie die *Handle Bar* Technik, die der in dieser Studie getesteten *Spindle* Technik sehr ähnlich ist. *Spindle* erreicht in der hier durchgeführten Studie aber durchgängig bessere durchschnittliche Zeiten, obwohl die gleichzeitige Skalierung sogar einen zusätzlichen Zeitaufwand bedeutet. Auch die Usability und die erfahrene Arbeitslast von *Crank Handle* werden in der Studie von Bossavit et al. (2014) sehr viel besser bewertet und bewegen sich auf einem ähnlichen Niveau wie *Handle Bar*, obwohl die Autoren selbst beschreiben, dass 33 % der Rotationen nicht korrekt erkannt wurden, was auf den Algorithmus zum Herleiten von der Drehrichtung zurückgeführt wird. Dieser Algorithmus wird auch in der hier vorgestellten Studie verwendet und weist ähnliche Probleme auf (siehe Kapitel 4.5.2). Bossavit et al. (2014) verwendeten die Kinect als Eingabe, was Auswirkungen auf die Resultate gehabt haben könnte. Die Autoren beschreiben aber nicht, dass es hier Probleme bei der Erkennung der Bewegungen der Nutzenden gab. Die Unterschiede sind also schwer zu erklären.

Cho und Wartell (2015) verglichen *Spindle* mit der darauf aufbauenden Technik *Spindle + Wheel*. Hierbei werden die Techniken zur Veränderung des Blickwinkels und damit indirekt als Fortbewegungstechnik verwendet. Die Objekte werden somit indirekt rotiert, positioniert und skaliert. *Spindle + Wheel* ermöglicht eine einfachere Drehung um die Achse, die beide Controller verbindet, indem die Rotation des Controllers in der dominanten Hand um die Achse zwischen den Controllern auf die Drehung des Objekts übertragen wird. Dies hätte hier eventuell für schnellere Zeiten gesorgt, da dann die Fahrradbewegung nicht nötig ist und auch das Objekt nicht umgegriffen werden muss, um es um diese Achse zu drehen. Durch diese Änderung wird die Technik allerdings asymmetrisch. Für diese

Studie wurde eine symmetrische Interaktionstechnik benötigt, weshalb *Spindle* gewählt wurde.

4.6.3 Scaled HOMER (+ Scale)

Da *Scaled HOMER + Scale* für diese Studie auf Basis von *Scaled HOMER* entwickelt wurde, soll hier im Detail auf die Resultate der beiden Techniken eingegangen und andere Studien dazu in Bezug gesetzt werden. *Scaled HOMER + Scale* erreichte insbesondere dort bessere Zeiten als *Scaled HOMER*, wo die Rotation des Objekts erforderlich war. Dies deutet darauf hin, dass die Beschleunigung der Rotation Vorteile gebracht hat. Es kann vermutet werden, dass hierdurch das *Clutching* reduziert werden konnte, was aber nicht aus den Daten der Studie abzuleiten ist, da nicht erfasst wurde, wie oft das Objekt erneut ausgewählt wurde. Auch bei der Präzision erhält *Scaled HOMER + Scale* mehr positive Bewertungen als *Scaled HOMER*, wofür die Verlangsamung bei langsamen Rotationen zuständig sein könnte. Anhand der objektiv erfassten Präzisionswerte bzgl. der Rotation ist dies allerdings nicht erkennbar. Dass eine skalierte Rotation die Nutzenden verwirrt und die allgemeine Performance verschlechtert, wie von Mendes et al. (2019) ausgeführt wird, konnte nicht festgestellt werden.

Der Mechanismus zum Skalieren von Objekten bei *Scaled HOMER + Scale* wurde von *Spindle* adaptiert und vergrößert/verkleinert Objekte abhängig von der Distanz zwischen den Controllern. Bei den Aufgaben, die die Skalierung von Objekten beinhalteten, erreichte *Scaled HOMER + Scale* ebenfalls gute Zeiten und befand sich im Mittel bei einer geringen Varianz vor den Techniken, die Buttons für die Skalierung verwendeten. Auch die im Mittel guten Einschätzungen der Usability durch die Testpersonen deuten auf eine insgesamt gute Nutzbarkeit der Technik hin. Die Skalierung könnte somit eine sinnvolle Erweiterung darstellen, auch wenn sich das Objekt bei der Skalierung nicht zwischen den Händen befindet, wie es bei *Spindle* der Fall ist.

Sowohl bei *Scaled HOMER* als auch bei *Scaled HOMER + Scale* gab es bei der Positionierung von Objekten Probleme, da die Abbildungsfunktion langsame Bewegungen zu stark verlangsamte. Auch konnte beobachtet werden, dass das Objekt bei Drehungen erneut gegriffen werden musste, auch wenn, wie bereits angesprochen, die beschleunigte Rotation dies möglicherweise reduziert hat. Insbesondere bei der Selektion von kleinen Objekten gestaltete sich dies aufgrund der Verwendung eines Lichtstrahls ohne Disambiguierung schwierig. Dennoch bevorzugten viele Testpersonen *Scaled HOMER + Scale* vor anderen Techniken (siehe Kapitel 4.5.2). Möglichkeiten, diese Technik zu verbessern, wären somit die Anpassung der Abbildungsfunktion für die Positionierung durch eine kleinere Skalierungskonstante (siehe Kapitel 4.2), sowie das Hinzufügen eines Disambiguierungsmechanismus, wie bereits in Kapitel 4.6.1 angesprochen. Dann könnte sich *Scaled HOMER + Scale* für eine Vielzahl verschiedener Szenarien eignen.

Obwohl *HOMER*, die Technik auf der *Scaled HOMER* und *Scaled HOMER + Scale* aufbauen, oft in der Literatur genannt wird, gibt es nur wenige Studien, die diese Technik untersuchen. Pierce und Pausch (2002) verglichen in einer Studie *Indirect HOMER*, eine Technik, wo die Distanz zum Objekt mittels zweier Buttons kontrolliert werden kann, mit *Voodoo Dolls*. *Voodoo Dolls* ermöglicht die Erstellung von Stellvertreterobjekten, mit

denen direkt interagiert werden kann, und deren relative Position zueinander auf die eigentlichen Objekte übertragen wird. In den getesteten Aufgaben sollten Objekte, die sich in Form und Größe unterschieden, auf unterschiedlichen Distanzen, hinsichtlich Position und Orientierung zu einem Zielobjekt, ausgerichtet werden. Dabei wurde nur die erreichte Präzision gemessen. Hier trat bei *HOMER* ein ähnliches Problem auf, wie bei vielen Techniken in der hier vorgestellten Studie. Es war schwer, eine hohe Präzision auf große Distanz zu erreichen. *Voodoo Dolls* schnitt dabei besser ab. Wilkes und Bowman (2008) verglichen *Scaled HOMER* mit *HOMER*. Dabei musste ein Objekt auf eine Zielposition bewegt werden. Die Variablen waren die Objektgröße, die Distanz zum Objekt, die Distanz zwischen Objekt und Ziel, sowie die Ausrichtung zum Objekt. Die Interaktion wurde dabei auf eine 2D-Ebene beschränkt und es war keine Rotation möglich. Hier konnten mit *Scaled HOMER* bessere Zeiten erreicht werden als mit *HOMER*, was auf die skalierte Abbildungsfunktion zurückgeführt wird. In beiden Studien wird nicht auf die in dieser Studie auftretenden Problematiken des Clutchings aufgrund des geringen Spielraums nach der Auswahl des Objekts und der problematischen erneuten Selektion durch den Lichtstrahl eingegangen. Damit hat die hier vorgestellte Studie neue Hinweise darauf geliefert, wo bei der Interaktion mit *HOMER* Techniken Probleme auftreten können.

4.6.4 Selektionsmechanismus

Head-based Selection nutzt eine hohe Verweilzeit, um ein Objekt zu selektieren und ist damit die Technik mit den wenigsten fehlerhaften Selektionen. Sanz (2011) beschreibt, dass diese Form der Selektion einen zusätzlichen Zeitaufwand induziert und anfällig für den Midas Touch Effekt (siehe Kapitel 2.2.3) sein kann. Ersteres ist auch in der hier durchgeführten Studie erkennbar. Der Midas Touch Effekt ist allerdings nicht aufgetreten, weil eine Verweilzeit von einer Sekunde gewählt wurde, wodurch es schwer war, das falsche Objekt auszuwählen. Außerdem handelt es sich in der Studie um künstliche Szenarien. In Umgebungen, wo sich die Nutzenden mehr umschauchen müssen und ein Objekt suchen müssen, um dieses dann auszuwählen, könnte der Effekt eher auftreten. Einige Testpersonen wünschten sich eine kürzere Zeit bis zur Selektion des Objekts. Müller-Tomfelde (2007) empfiehlt nach entsprechenden Untersuchungen eine Zeit von 350 bis 600 ms. Diese Arbeit war allerdings vor der Durchführung der Studie noch nicht bekannt.

Ob der Button zur Auswahl oder zum Freigeben eines Objekts gedrückt oder losgelassen werden muss, schien in der Studie ebenfalls Auswirkungen zu haben. Bei *Bimanual Fishing Reel + Scale* wurde das Objekt nach der Selektion an den Lichtstrahl geheftet und der Trigger musste erneut gedrückt werden, um das Objekt loszulassen. Hierbei war zu beobachten, dass das Drücken des Triggers den Lichtstrahl und damit das Objekt etwas verschob und somit der Heisenberg Effekt auftrat. Hierfür musste der Trigger außerdem komplett durchgedrückt werden, wodurch sich der Effekt nochmals verstärkt haben könnte. Ein ähnlicher Effekt wurde bereits im Kapitel 4.5.1 bei der *Simple Virtual Hand* Technik beschrieben, wo der lange Weg des Triggers vermutlich zu einigen wenigen fehlerhaften Selektionen führte. Eine kleine Anzahl an Testpersonen merkte zudem an, dass sie lieber den Button gedrückt halten, während sie das Objekt halten und nicht den Button erneut drücken wollen, um das Objekt loszulassen. Diese Beobachtungen zeigen, dass auch kleine Implementierungsdetails Auswirkungen auf die Performance einer Technik haben könnten.

4.6.5 Buttons

Die *Bimanual Fishing Reel + Scale* Technik empfand ein Großteil der Testpersonen bei der Manipulation im Mittel als weniger physisch anspruchsvoll, was die Aussage von Bowman (2002) unterstützt, dass die indirekte Manipulation von Objekten durch Buttons zu weniger Ermüdung der Arme führt. Allerdings war eine erhöhte kognitive Belastung in den Daten erkennbar, was vermutlich ebenfalls auf die Vielzahl von Buttons zurückzuführen ist. Bowman (2002) führt ebenfalls an, dass sich die indirekte Kontrolle mit Buttons unnatürlich anfühlen kann und aus diesem Grund mehr Einarbeitungszeit benötigt wird, um sich an die Technik zu gewöhnen. Dies deckt sich mit den Ergebnissen dieser Studie, denn für die Natürlichkeit der Technik wurden einige neutrale und negative Bewertungen vergeben.

Mit der Skalierung über Buttons gehörte *Bimanual Fishing Reel + Scale* im Mittel zu den langsamsten Techniken, sobald die Skalierung erforderlich war. Die Präzision bezüglich der Skalierung erreicht dabei durchschnittlich sehr gute Werte, wobei hier alle Techniken ähnlich gut abschnitten, weshalb schwer verlässliche Aussagen getroffen werden können. Bowman und Hodges (1999) schildern gute Zeiten in Szenarien, wo eine hohe Genauigkeit erforderlich ist, wenn die Technik Buttons nutzt, um die Distanz zwischen Objekt und Controller zu verändern. *Bimanual Fishing Reel + Scale* nutzt Buttons auf eine ähnliche Weise, aber in der Studie wurden von den Teilnehmenden vor allem Handbewegungen benutzt, um die Position des Objekts zu steuern. Aus der Studie lassen sich somit schwer weitere Hinweise auf die Vor- und Nachteile in Bezug auf die Nutzung von Buttons ableiten.

4.6.6 Scaled Scrolling World In Miniature + Scale

Scaled Scrolling World In Miniature + Scale wurde für diese Studie entwickelt und erweitert *Scaled Scrolling World In Miniature* durch die Möglichkeit, Objekte zu skalieren, weshalb die Ergebnisse hier noch einmal im Detail besprochen werden sollen. Einige wenige Testpersonen stießen mit dem Controller an das Headset, als sie das Modell aus nächster Nähe betrachten wollten oder stießen mit den Controllern zusammen. Dies beschreiben auch die Autoren der originalen *World In Miniature* Technik (Stoakley et al., 1995) und haben die Möglichkeit eingebaut, das Modell durch das Drücken eines Buttons in der Welt schweben zu lassen. Dies hätte in dieser Studie vorteilhaft sein können und z.B. die physische Beanspruchung verringern können, die von den Testpersonen aber nicht auffällig hoch eingeschätzt wurde. Zwar wurden die physischen Anforderungen in der Teilstudie zur Selektion etwas negativer bewertet, was aber vermutlich an der hohen Anzahl an weniger aufwändigen Vergleichstechniken lag.

Die Teilstudie zur Manipulation offenbart dagegen ein Problem, das so in der Literatur nicht anzutreffen war. Mit der Technik ist es schwer, eine hohe Präzision zu erreichen, da Abweichungen, die im Miniaturmodell aufgrund der Verkleinerung noch gering scheinen, große Auswirkungen auf die tatsächlichen Objekte haben können. Dies betrifft sowohl die Position als auch die Rotation und Größe eines Objekts. Der natürliche Tremor und der Heisenberg Effekt könnten somit eine noch größere Wirkung haben als bei anderen Techniken.

World In Miniature ist eine in der Literatur oft behandelte Eingabemethode, die sich jedoch stark von anderen Techniken unterscheidet und selten in Studien untersucht wird. Eine der wenigen Studien, die sich mit *World In Miniature* auseinandersetzt, wurde von Wingrave et al. (2006) durchgeführt und vergleicht die originale Technik mit *Scaled Scrolling World In Miniature*. Beide Techniken schnitten ähnlich gut ab, wobei nur Szenarien getestet werden konnten, für die beide Techniken verwendbar sind. Potenziell ist *Scaled Scrolling World In Miniature* durch das Zoomen und Verschieben des Miniaturmodells ausdrucksstärker und kann auch für größere Umgebungen eingesetzt werden. Die hier vorgestellte Studie leistet somit einen Beitrag, um das Verhalten einer *World in Miniature* Technik in verschiedenen Szenarien besser beleuchten zu können und einen Vergleich mit einer größeren Anzahl an Techniken zu ermöglichen.

In der Teilstudie zur Selektion lag *Scaled Scrolling World In Miniature + Scale* bei den erreichten Zeiten noch im Mittelfeld, wobei allerdings nur wenige fehlerhafte Selektionen auftraten. Bei der Teilstudie zur Manipulation war die Technik dann im Mittel meist eine der schnellsten, solange keine Skalierung nötig ist. Zu beachten ist hierbei, dass zusätzliche Arbeitsschritte durch die Skalierung und Translation der Miniaturwelt nötig sind, die Zeit kosten, die nicht in der eigentlichen Zeitmessung miteinbezogen werden und auch die Komplexität der Technik erhöhen. Es ist zu vermuten, dass die Technik in realitätsnäheren Szenarien schlechter abschneidet. Anhand der Bemerkungen der Testpersonen war zu erkennen, dass die Skalierung für einige zu sensitiv umgesetzt wurde und oft wurde auch erst in die falsche Richtung skaliert. Auch die indirekte Bewegung des Objekts bei der Skalierung und die versehentliche Skalierung des Objekts, wenn dieses in der Hand gehalten wurde, während eigentlich die Miniaturwelt skaliert werden sollte, waren problematisch. Eine direkte Skalierung des Objekts, wenn es gehalten wird, könnte einem Teil dieser Probleme entgegenwirken. Aus der im Mittel vergleichsweise geringeren Usability in der Teilstudie zur Selektion und den Äußerungen der Testpersonen kann gedeutet werden, dass die Technik zu aufwändig ist, wenn damit nur eine Selektion durchgeführt werden soll. Wenn allerdings zusätzlich Objekte manipuliert werden, könnte die Technik in vielen Szenarien eine valide Möglichkeit der Interaktion darstellen, solange die Präzision nicht im Fokus steht. Die Skalierung des Miniaturmodells und von Objekten sollte allerdings optimiert werden, indem das Objekt z.B. wie beschrieben direkt skaliert wird und die Skalierung über die Buttons besser übersetzt wird.

4.6.7 Abbildungsfunktion

Erwartungsgemäß wurden Techniken, die in allen durchführbaren Transformationen eine isomorphe Abbildung nutzen, meist als sehr natürlich eingeschätzt und erreichten eine hohe Usability. *Simple Virtual Hand* ermöglicht z.B. aufgrund der isomorphen Abbildung der Bewegungen des Controllers auf den virtuellen Cursor einen hohen Grad an Propriozeption und damit eine intuitive, effiziente und unkomplizierte Form der Interaktion (Mine et al., 1997). Dies wird auch durch die sehr positiven subjektiven Bewertungen hinsichtlich Natürlichkeit, mentalen Anforderungen und Frustration gestützt. Die Ausdrucksstärke ist allerdings eingeschränkt, weil derartige Techniken nur auf kurze Distanz funktionieren können. Hervorzuheben ist, dass auch *Scaled HOMER + Scale* als eher natürlich eingeschätzt wurde und eine gute Usability erreicht, obwohl die Transferfunktion sowohl bei der Rotation als auch bei der Positionierung skaliert ist. Die objektiven Mes-

sungen bescheinigen der Technik eine gute Performance, was darauf hindeutet, dass eine gut integrierte skalierte Abbildungsfunktion vorteilhaft sein kann. Bei *Go-Go + PRISM* führte die Integration von geschwindigkeits- und bereichsorientierter Abbildungsfunktion zu teilweise unvorhersehbaren Bewegungen des Cursors. Dieses unvorhersehbare Verhalten beschreiben auch König et al. (2009) bei nicht isomorphen Techniken. In dieser Studie war zu merken, dass die Testpersonen gezwungen waren, sich auf das visuelle Feedback zu verlassen, um die Spitze des Cursors in das Objekt zu führen, bis dieses hervorgehoben wurde. Es war kaum möglich, sich auf die Propriozeption zu verlassen, weil sich die Positionen des Controllers und des virtuellen Cursors teilweise stark unterschieden.

Auteri et al. (2015) haben in einer Studie *Go-Go + PRISM* mit *Go-Go* verglichen. Dabei schnitt *Go-Go + PRISM* sehr viel besser ab als *Go-Go*. Allerdings sollte in der Studie eine Positionsaufgabe durchgeführt werden, wobei ein Objekt innerhalb von zwei Minuten so oft wie möglich auf eine Zielposition bewegt werden musste und die Distanz zum Objekt nur 2,3 m betrug. Die Zeiten in der genannten Studie waren sogar sehr viel schlechter als in der hier vorgestellten Studie. Der Vergleich ist allerdings schwierig, da andere Eingabegeräte verwendet wurden und in der genannten Studie auch die Zeit zur Selektion und zwischen den Aufgaben einfließt. Die Testpersonen berichteten aber auch in der Studie von Auteri et al. (2015) davon, dass sie weniger Kontrolle bei der *Go-Go + PRISM* Technik verspürten als bei *Go-Go*, auch wenn die Technik objektiv schneller war. In anderen Studien (Bowman et al., 1999; Poupyrev & Ichikawa, 1999) erzielte die *Go-Go* Technik, im Vergleich zu anderen Techniken, bessere Resultate bei der Manipulation von Objekten als *Go-Go + PRISM* in der hier präsentierten Studie. Dies deutet ebenfalls darauf hin, wie problematisch die skalierte Abbildungsfunktion hier ist. In der Teilstudie zur Manipulation schnitt *Go-Go + PRISM* besser im Vergleich zu den anderen Techniken ab als bei der Selektion, aber auch hier hatten viele der Teilnehmenden Probleme mit der Abbildung der Bewegungen des Controllers auf den Cursor. Das wirkte sich wiederum auf die Usability in beiden Teilstudien aus, die als eher schlecht eingeschätzt wurde. Ähnlich sieht es bei den anderen subjektiven Bewertungen aus. Mit der umgesetzten Abbildungsfunktion ist die Technik somit in keinem der getesteten Szenarien empfehlenswert.

Die Techniken, die eine neu zugeordnete Abbildungsfunktion nutzen, lieferten in der Studie unterschiedliche Resultate. Die Abbildung von Positionsänderungen auf die Rotation eines Objekts führte zu schlechten Zeiten bei der Durchführung von Aufgaben und schlechten Bewertungen durch die Testpersonen, wie bereits anhand der *Crank Handle* Technik besprochen wurde (siehe Kapitel 4.6.2). Die Abbildung durch Stellvertreterobjekte lieferte bei der *Scaled Scrolling World In Miniature + Scale* Technik dagegen gute Ergebnisse (siehe Kapitel 4.6.6). Die Objekte werden indirekt in den Aktionsradius der Nutzenden geholt und ermöglichen eine schnelle Interaktion.

Der direkte Vergleich von *Scaled HOMER* und *Scaled HOMER + Scale* lässt die Vermutung zu, dass eine skalierte Rotation Ermüdungserscheinungen reduzieren kann (siehe Kapitel 4.6.3). Die grundsätzlich zu stark skalierte Abbildungsfunktion bei der Positionierung wurde aber bei beiden Techniken angemerkt. Die Abbildungsfunktion muss also passend gewählt werden und eine entsprechende Übungszeit zur Verfügung stehen, um sich an die Skalierung zu gewöhnen.

Auffällig war zudem, dass einige Testpersonen die indirekte Drehung bei *Scaled HOMER (+Scale)* und *Bimanual Fishing Reel + Scale* sehr irritierend fanden und damit große

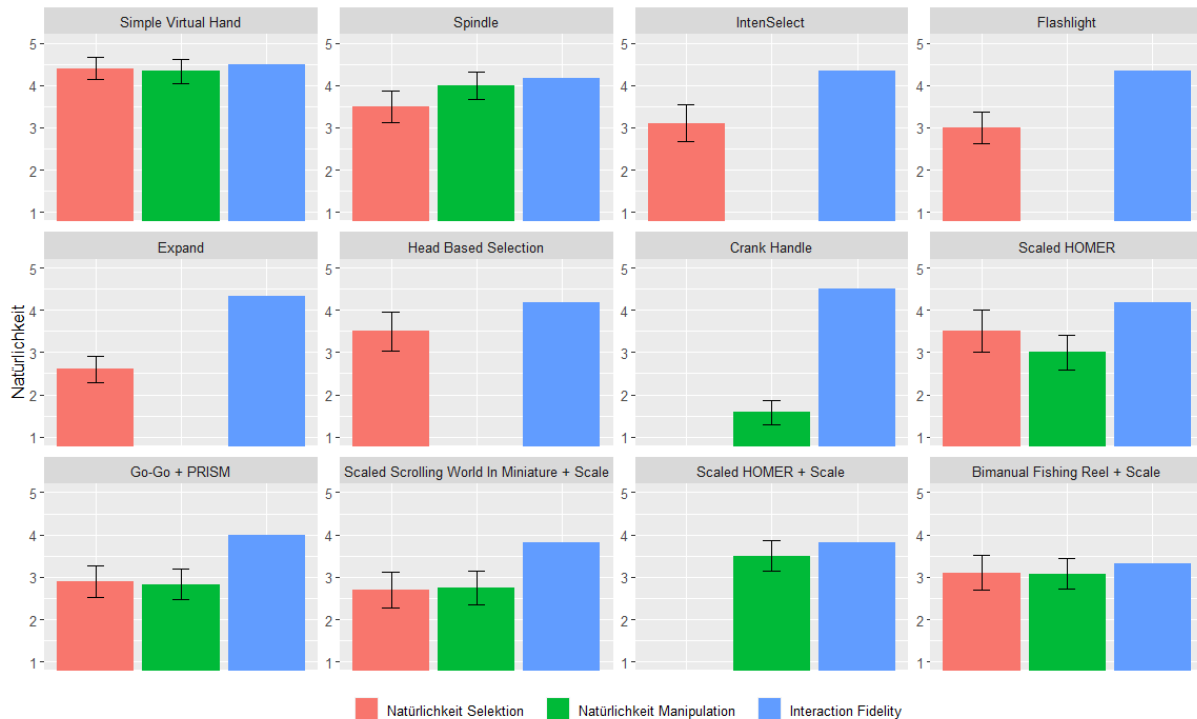


Abbildung 4.33: Subjektive Natürlichkeit im Vergleich zur Interaction Fidelity. Die Fehlerbalken stellen den Standardfehler dar.

Probleme hatten. Ein Teil dieser Testpersonen merkte an, dass sich das Objekt genau andersherum drehte, als sie es erwarten würden, und sie in Computerspielen auch die Invertierung der Steuerung aktivieren. Dies ist ein Indiz dafür, dass eine derartige Einstellungsmöglichkeit zum Invertieren der Drehung auch bei einigen Interaktionstechniken Sinn machen könnte.

4.6.8 Natürlichkeit und Interaction Fidelity

Die gefühlte Natürlichkeit der Interaktionstechniken wurde abgefragt, um diese in Bezug zur Interaction Fidelity zu setzen, die mit Hilfe des FIFA Frameworks (siehe Kapitel 3.2.12) eingeschätzt wurde. Abbildung 4.33 stellt die durchschnittlichen Bewertungen der Testpersonen und die Interaction Fidelity dar. Sowohl die Likert-Skala für die Natürlichkeit als auch der Wertebereich für die Interaction Fidelity geht von 1 bis 5. Da nicht jede Technik in beiden Teilstudien genutzt wurde, fehlen dort entsprechend auch die Einschätzungen.

Im Allgemeinen liegt die subjektive eingeschätzte Natürlichkeit unter dem Wert, der durch FIFA ermittelt wurde. Die Natürlichkeit der Techniken wird in den beiden Teilstudien meist sehr ähnlich eingeschätzt. Nur bei *Spindle* und *Scaled HOMER* können leichte Unterschiede vermutet werden, was vermutlich daran liegt, dass sich die durchzuführenden Aktionen für die Selektion und die Manipulation hier stärker unterscheiden. Theoretisch müsste dies auch bei *Bimanual Fishing Reel + Scale* erkennbar sein, aber hier wurden bereits aufgrund der teilweise schwierigen Selektion geringe Bewertungen bei der Natürlichkeit vergeben. Die hohe Frustration hat sich, wie bereits erwähnt, auch bei der

Natürlichkeit von *Crank Handle* niedergeschlagen. Hier ist eine hohe Diskrepanz zur Interaction Fidelity erkennbar. Die Interaction Fidelity ist hier auch sehr hoch und hängt von der gewählten Vergleichsmetapher ab. Der durch FIFA ermittelte Wert wäre geringer, wenn das Greifen, Positionieren und Rotieren mit der Hand als Vergleichsmetapher gedient hätten. Bossavit et al. (2014) haben die Technik allerdings auf Basis der Verwendung von Kurbeln für die Objektdrehung entwickelt und entsprechend ist auch die Interaction Fidelity als hoch einzuschätzen. Auch bei *Go-Go + PRISM* gab es Probleme aufgrund der unvorhersehbaren Skalierungsfunktion, was sich auf die subjektive Natürlichkeit ausgewirkt hat. Bei den Selektionstechniken *IntenSelect*, *Flashlight* und *Expand* sind größere Unterschiede zwischen den subjektiven Einschätzungen und der durch FIFA ermittelten Werte zu erkennen. Dies kann darauf hindeuten, dass, wie bereits in Kapitel 3.2.12 angesprochen, Komponenten, wie ein zweiter Lichtstrahl oder Disambiguierung, die Natürlichkeit verringern, was aber nicht von dem Framework abgedeckt wird.

Die Ergebnisse sind mit Vorsicht zu betrachten. Die erfahrene Natürlichkeit wurde nur mit einer Frage ermittelt und weist daher eine geringe Reliabilität auf. Auch scheinen sich Frustration und unvorhersehbares Verhalten der Techniken sehr negativ auf die Natürlichkeit der Techniken ausgewirkt zu haben. Des Weiteren gibt es hohe Abweichungen zwischen den Bewertungen der Testpersonen, was bereits in den Abbildungen 4.22 und 4.31 erkennbar war. Hier können unterschiedliche Vorerfahrungen mit ähnlichen Interaktionsformen eine Rolle spielen und auch, wie gut die Techniken für die verschiedenen Testpersonen nutzbar waren, hatte hier vermutlich einen Einfluss. Des Weiteren haben die in dieser Arbeit betrachteten Techniken nach dem FIFA Framework grundsätzlich eine höhere Interaction Fidelity, da sie auf Bewegungen im dreidimensionalen Raum beruhen. Den Testpersonen standen andere Techniken aber gar nicht zum Vergleich zur Verfügung. Um tatsächlich Rückschlüsse von der subjektiven Natürlichkeit auf die Interaction Fidelity ziehen zu können, sollte ein validierter Fragebogen für die Natürlichkeit verwendet werden anstatt nur einer Frage, um so möglicherweise auch den Einfluss anderer Faktoren zu verringern, wie die Usability, die sich hier vermutlich stark auf die Beantwortung der Frage ausgewirkt hat. Es sollten außerdem weniger Techniken überprüft werden und das FIFA Framework hinsichtlich der Selektion und Manipulation getrennt angewendet werden, da sich Techniken teilweise stark in der Nutzung für die einzelnen Aufgaben unterscheiden.

4.6.9 Einfluss der Metapher

Bei der Teilstudie zur Selektion konnten sowohl Techniken, die auf der Geste des Greifens, als auch Techniken, die auf der Geste des Zeigens basieren, auf kurze Distanz ähnlich gute objektive und subjektive Werte erreichen. Nur *Spindle* wurde in den Fragebögen etwas schlechter bewertet, was aber wahrscheinlich auf die Notwendigkeit beider Hände zurückzuführen ist (siehe Kapitel 4.6.10). *Go-Go + PRISM* ist die einzige Greif-basierte Technik in dieser Studie, die es auch ermöglichte Objekte, auf größerer Distanz zu selektieren und gehört dabei meist zu den langsamsten Techniken. Diese Ergebnisse stehen im Kontrast zur Studie von Poupyrev und Ichikawa (1999), wo *Go-Go* mit der *Simple Virtual Hand* Technik und *Ray-Casting* verglichen wurde. Hier sollten ebenfalls Objekte in verschiedenen Größen auf Distanzen bis 6 m selektiert werden. *Go-Go* war dabei meist die schnellste Technik, insbesondere bei kleineren Objekten auf größerer Distanz. In der hier vorgestellten Studie erzielt *Go-Go + PRISM* allerdings sehr viel schlechtere Ergebnisse,

was vermutlich auf die verwendete Abbildungsfunktion zurückzuführen ist und bereits in Kapitel 4.6.7 angesprochen wurde. In der Studie von Poupyrev und Ichikawa (1999) erreicht *Go-Go* ähnlich gute Zeiten wie *Simple Virtual Hand*, was in der hier vorgestellten Studie nicht der Fall ist. In Bowman et al. (1999) ist *Go-Go* allerdings signifikant langsamer als *Ray-Casting* und *Occlusion*, insbesondere auf größerer Distanz. Die verwendeten Objekte sind dort aber auch sehr viel größer. Somit lassen sich die genannten Studien schwer mit der in dieser Arbeit präsentierten Studie vergleichen. Die skalierte Abbildungsfunktion von *Go-Go + PRISM* scheint hier einen zu starken Einfluss auf die Performance der Technik gehabt zu haben, um Rückschlüsse auf die zugrundeliegende Metapher ziehen zu können.

Die volumenbasierten Techniken wie *Flashlight* und *IntenSelect* schnitten bei der Selektionsstudie im Allgemeinen besser ab als *Scaled HOMER* und *Bimanual Fishing Reel + Scale*, die einen Lichtstrahl verwenden. Aber auch hierfür ist der Grund eher in der Verwendung von Disambiguierung zu suchen und nicht in der verwendeten Metapher

Auffällig waren die hohen physischen Anforderungen von Techniken, die auf der Zeige-Geste basieren und keine Disambiguierung nutzten. Die Testpersonen mussten den Arm häufig sehr lange ausstrecken und versuchen, ihn ruhig zu halten, um kleine Objekte auf großer Distanz zu treffen, was vermutlich zur Ermüdung der Arme führte. Bisherige Untersuchungen zeigten vor allem, dass Techniken, die auf der Geste des Greifens basieren, durch den Mehraufwand an Bewegungen physisch anspruchsvoller sind (siehe z.B. Cockburn et al. (2011)). Die Notwendigkeit, den Arm lange auszustrecken, kann allerdings auch zu einer Ermüdung des Arms führen (Hincapié-Ramos et al., 2014), was bei den Techniken, die die Zeige-Geste verwenden und keine Disambiguierung nutzen, der Fall war.

Die Ergebnisse in der Manipulationsstudie deuten darauf hin, dass auf kurze Distanz eine direkte handbasierte Interaktion für eine höhere Präzision und angenehmere Interaktion sorgt. So erreichte *Simple Virtual Hand* hier durchgängig die besten Resultate. Dies unterstützt die Aussage von Mine et al. (1997), dass Objekte bevorzugt manipuliert werden, wenn sie an die Hand gebunden sind. Auch Bowman et al. (1999) zeigten, dass diese Art Manipulation effektiver und zufriedenstellender ist. Die hybriden Techniken *Scaled HOMER* und *Scaled HOMER + Scale* haben auf große Distanz vor allem Probleme bei der Drehung des Objekts, weil das Handgelenk danach nicht mehr viel Spielraum hat. Das erneute Selektieren der Objekte sorgt, wie bereits angesprochen, für Probleme, weil hier die Selektion von kleineren Objekten ohne Disambiguierung problematisch ist. Bei der Technik *Bimanual Fishing Reel + Scale*, die auf der Geste des Zeigens basiert, tritt der Heisenberg Effekt auf und es ist allgemein schwierig, den Lichtstrahl ruhig zu halten. Diese Ergebnisse lassen sich in erster Linie auf die verwendete Abbildungsfunktion und die Verwendung von Disambiguierung zurückführen und nicht auf die Metapher.

Allgemein ist es somit schwierig, aus den Resultaten Rückschlüsse auf Vor- und Nachteile der verwendeten Metapher zu ziehen. Andere Eigenschaften, wie die Abbildungsfunktionen oder die Verwendung von Disambiguierung, lassen einen größeren Einfluss vermuten.

4.6.10 Einhändigkeit vs. Zweihändigkeit

Bei der Teilstudie zur Selektion waren *Spindle* und *Scaled Scrolling World In Miniature + Scale* die einzigen zweihändigen Techniken. Beide Techniken erhielten im Mittel schlechtere Usability-Werte im Vergleich zu den meisten einhändigen Techniken, und einige Testpersonen gaben an, dass es ungewöhnlich war, diese Techniken nur für die Selektion zu nutzen. Bei *Spindle* kann vermutet werden, dass dies tatsächlich auf die Zweihändigkeit zurückgeführt werden kann, weil die Testpersonen es als umständlich empfanden, mit beiden Händen zum Objekt zu gehen, worauf auch die Bewertungen bei der erhöhten physischen Anforderungen hindeuten. *Scaled Scrolling World In Miniature + Scale* wurde vor allem aufgrund der hohen Komplexität als eher ungeeignet für die Selektion empfunden. In der Selektionsstudie lag *Spindle* bei der Sortierung der Techniken noch auf dem vorletzten Platz (siehe Kapitel 4.5.1), erreichte in der Manipulationsstudie allerdings den ersten Platz (siehe Kapitel 4.5.2). Inwieweit die Zweihändigkeit tatsächlich Auswirkungen auf die Selektion von Objekten hat, müsste weiter untersucht werden. Dies zeigt allerdings, dass eine gute Manipulationstechnik nicht zwangsläufig auch eine gute Selektionstechnik ist. Es kann sich also lohnen, für die Selektion eine andere Technik zu verwenden, wenn diese gehäuft ohne anschließende Manipulation durchgeführt werden muss. Soll nach der Auswahl des Objektes dieses verändert werden, sollten die Techniken entsprechend nahtlos ineinander übergehen (Bowman, 2002).

Aus den objektiv erfassten Daten der Teilstudie zur Manipulation sind keine Vor- oder Nachteile von einhändigen oder zweihändigen Techniken ableitbar. Einige Testpersonen wünschten sich allerdings, beide Hände verwenden zu können, wenn nur eine Hand bei einer Technik nutzbar war, wie z.B. bei *Simple Virtual Hand*. Entsprechend wurde sich positiv bei zweihändigen Techniken geäußert. Die Nutzung beider Hände ermöglichte außerdem vermutlich eine natürliche Form der Skalierung, durch die Distanz zwischen beiden Controllern, was von vielen Teilnehmenden bei der *Spindle* und *Scaled HOMER + Scale* positiv angemerkt wurde.

Schultheis et al. (2012) vergleichen eine Form von *Spindle* mit einer Form von *Simple Virtual Hand*. Allerdings wurde ein stereoskopischer Monitor verwendet und die Techniken werden genutzt, um die Blickrichtung zu verändern, womit Objekte indirekt manipuliert werden. Außerdem wurden unterschiedliche Eingabegeräte verwendet. *Spindle* schnitt hier besser ab als *Simple Virtual Hand*, was die Autoren vor allem auf die lange Übungszeit zurückführen. Es ist unklar, ob auch in der hier vorgestellten Studie mehr Training dazu geführt hätte, dass *Spindle* bessere Resultate erzielt hätte. Die Testpersonen wirkten sehr sicher und nur die Fahrradbewegung wäre dann eventuell besser kontrollierbar gewesen. Ansonsten ist es, aufgrund der verschiedenen Vorbedingungen schwer, die Studien miteinander zu vergleichen.

4.6.11 Kritische Betrachtung der Studie

Bei der Durchführung und Auswertung der Studie traten einige Schwierigkeiten auf, die hier gezielt angesprochen werden sollen, um sie in zukünftigen Studien vermeiden zu können. In der Studie wurden die Techniken hinsichtlich verschiedener Aufgabentypen und Distanzen miteinander verglichen. Nicht jede Technik unterstützte dabei jeden Aufgaben-

typen und jede Distanz, weshalb Dummy-Aufgaben für einige Techniken generiert wurden (siehe Kapitel 4.14). Dies könnte direkten Einfluss auf die subjektiven Bewertungen der Testpersonen gehabt haben, da mit einigen Techniken schwierigere Aufgaben gelöst werden mussten, auch wenn vor dem Ausfüllen des Fragebogens darauf hingewiesen wurde, die Fragen auf die Technik und nicht die Aufgaben zu beziehen. Des Weiteren führte die Sortierung der Aufgaben (kurze Distanzen zuerst, Aufgaben mit Skalierung zuletzt) dazu, dass die Testpersonen mit Techniken, die alle Distanzen und Skalierungen unterstützten, mehr Training hatten, bevor Aufgaben für größere Distanzen kamen als bei Techniken ohne Skalierung.

Bei Aufgaben, wo nur die Rotation erforderlich war, war es öfter nötig, das Objekt ebenfalls zu positionieren, da sich das zu manipulierende Objekt und das Zielobjekt überlappen und so das Erkennen der richtigen Drehung erschwert wurde. Eine Alternative wäre gewesen, die Objekte nebeneinander darzustellen und nur die Rotation zu fordern. Dann wäre es aber nicht möglich gewesen, dabei die Präzision der Position zu erfassen.

Bei der Manipulation ist auf größeren Distanzen bei nahezu jeder Technik eine hohe Varianz bei der Präzision erkennbar. Dies lag daran, dass es über eine größere Entfernung hinweg schwieriger wird, die Unterschiede in Position, Rotation und Größe zwischen dem zu manipulierenden Objekt und dem Zielobjekt zu erkennen. Dies lag zum einen an der begrenzten Auflösung des VR-Systems und an fehlenden Unterstützungsmöglichkeiten durch die Techniken. Dies ist allerdings nicht zwangsläufig ein Problem der Studie. Es gibt Techniken, die hier Unterstützung bieten, z.B. in Form eines Zooms (Osawa, 2006) oder durch die Verwendung von Stellvertreterobjekten (Pierce & Pausch, 2002).

Der eingangs erwähnte Mechanismus, um zu erreichen, dass sowohl die Präzision als auch die Geschwindigkeit fokussiert wird (siehe Kapitel 4.3.4), hat nicht immer funktioniert. Bei einigen Testpersonen war erkennbar, dass sie präziser oder schneller arbeiteten. Es ist sinnvoller, die Metriken in getrennten und spezialisierten Aufgaben zu erfassen.

Einige der Techniken basieren auf Parametern, wie z.B. die Skalierungskonstante bei *Scaled HOMER*, die einen starken Einfluss auf die Performance und Usability der Technik haben können. Wie bereits angesprochen, werden für diese Parameter aber oft keine konkreten Werte in den entsprechenden Arbeiten angegeben. Aus diesem Grund mussten diese Parameter meist durch eigene Tests bestimmt und in der Vorstudie validiert werden. Die geringe Anzahl von vier Testpersonen und die vielen zu testenden Techniken führte allerdings dazu, dass jede Technik hier nur von einer Testperson genutzt wurde. Eine dedizierte Pilot-Studie zur Ermittlung der optimalen Parameter für die einzelnen Techniken wäre sinnvoll gewesen, um Probleme verhindern zu können, die vermutlich auf die falsche Parameter-Wahl zurückzuführen sind.

Bei einigen Techniken war gut sichtbar, dass die Testpersonen unterschiedlich gut mit diesen zurecht kamen. Derartige Nutzerabhängigkeiten sind normal, erschweren die Gegenüberstellung der Techniken in einer Studie allerdings (Bowman, Gabbard & Hix, 2002). Hier kann in erster Linie eine höhere Anzahl an Testpersonen Abhilfe schaffen, um die Bevölkerung möglichst breit abzudecken. Dies war aufgrund hier des komplexen Studiendesigns schwer möglich. Zwar haben 52 Testpersonen an der Studie teilgenommen, was vergleichbar mit der Anzahl an Teilnehmenden in ähnlichen Studien ist, doch wurden diese auf die zwei Teilstudien aufgeteilt. Außerdem konnte aufgrund der vielen Inter-

aktionstechniken und unabhängigen Variablen nicht jede Technik von jeder Testperson getestet werden, was die Anzahl an Teilnehmenden pro Technik weiter verringerte. Für eine explorative Studie, wie der hier vorgestellten, ist dieses Vorgehen vertretbar, bei der Auswertung und Übertragung der Ergebnisse muss dies aber berücksichtigt werden. Im Falle einer hypothesengeleiteten Untersuchung sollte eine geringere Anzahl an Techniken miteinander verglichen und z.B. ein Within-Subject Design gewählt werden, in dem jede Testperson jede Technik testet.

4.7 Zusammenfassung der Erkenntnisse und Hypothesengenerierung

In der Studie waren bereits bekannte Verhaltensweisen der Techniken erkennbar, es konnten aber auch Indizien für Vor- und Nachteile von Techniken oder spezifischer Eigenschaften von diesen identifiziert werden. Außerdem konnten mögliche Anpassungen oder Erweiterungen von Techniken gefunden werden, die sich vorteilhaft auf die Performance und Usability auswirken könnten. Diese Erkenntnisse sollen nun zusammengefasst werden, indem Aussagen aus vorangegangenen Arbeiten und Ergebnisse aus anderen Studien mit den Ergebnissen dieser Studie unterstützt werden und Hypothesen generiert werden, die in weiterführenden Studien untersucht werden können. Abschließend wird eine Schlussfolgerung zu den Ergebnissen der Studie gegeben.

4.7.1 Unterstützende Ergebnisse

Die folgenden Aussagen sind vorangegangenen Studien und Arbeiten entnommen und werden durch die Ergebnisse dieser Studie gestützt. So können bisherige Erkenntnisse im Forschungsbereich der 3D-Interaktion gestärkt werden, auch wenn die Studie durch ihren explorativen Charakter keine eigenständigen Schlussfolgerungen zulässt.

A1: *Die Selektion von Objekten mit einer kleinen visuellen Größe ist mit vektorbasierten Techniken langsam und fehleranfällig, da hier eine sehr präzise Kontrolle des Selektionswerkzeuges nötig ist. (Bacim et al., 2013; Kopper et al., 2011; Steed & Parker, 2004)*

A2: *Volumenbasierte Techniken mit einer einstufigen oder mehrstufigen Disambiguierung vereinfachen die Selektion von Objekten mit kleiner visueller Größe im Vergleich zu vektorbasierten Techniken ohne Disambiguierung. (Bacim et al., 2013; De Haan et al., 2005; Hinckley et al., 1994; Kopper et al., 2011; Liang & Green, 1994; Steed & Parker, 2004)*

A3: *Die Verwendung einer mehrschrittigen Disambiguierung reduziert die Anzahl an fehlerhaften Selektionen im Vergleich zu Techniken ohne Disambiguierung oder mit einstufiger Disambiguierung, kostet in der Regel aber mehr Zeit. (Bacim et al., 2013; Cashion et al., 2013; Kopper et al., 2011)*

Bei den vektorbasierten Techniken *Scaled HOMER* und *Bimanual Fishing Reel + Scale* hatten die Testpersonen insbesondere im Szenario mit der kleinsten Objektgröße und der größten Entfernung teilweise große Probleme, den Lichtstrahl im Moment der Selektion auf dem Objekt zu halten. Dies führt zu langsameren Zeiten und einer höheren Anzahl an Fehlern im Vergleich zu den meisten anderen Techniken. Die durchschnittlichen Zeiten der volumenbasierten Techniken mit einstufiger Disambiguierung *Flashlight* und *IntenSelect* waren dagegen durchgängig unter den schnellsten Techniken, und insbesondere bei kleinen Objekten auf großer Entfernung lassen die Ergebnisse eine schnellere Selektion als mit den vektorbasierten Techniken ohne Disambiguierung vermuten. Auch fehlerhafte Selektionen traten sehr viel seltener auf. Bei einzelnen Objekten musste nur grob in die richtige Richtung gezeigt werden, um das Objekt zu treffen. Auch die subjektiven Bewertungen der Testpersonen fielen bei diesen Techniken im Mittel besser aus. Die mehrstufige Technik *Expand* erreichte in schwierigen Szenarien im Mittel ebenfalls bessere Zeiten als die vektorbasierten Techniken ohne Disambiguierung, trotz zusätzlichen Zeitaufwands durch die mehrstufige Auswahl. Bei *Expand* traten außerdem so gut wie keine Fehler auf. Somit können Techniken mit einer mehrstufigen Disambiguierung in Szenarien Sinn machen, wo es auf eine hohe Präzision ankommt und z.B. mit einem zusätzlichen Zeitaufwand gerechnet werden muss, wenn falsche Selektionen revidiert werden müssen (Cashion et al., 2013).

A4: *Techniken, die auf der Geste des Zeigens basieren, sind bei der Selektion von Objekten weniger physisch anstrengend als Techniken, die auf dem Greifen basieren. (Cockburn et al., 2011; Hincapié-Ramos et al., 2014)*

A5: *Vektorbasierte Techniken ohne Disambiguierung können körperlich anstrengender sein als derartige Techniken ohne Disambiguierung. (Kopper et al., 2011)*

Bei den auf der Geste des Greifens basierenden Techniken *Simple Virtual Hand* und *Spindle* wurden die physischen Anforderungen in der Selektionsstudie im Mittel höher eingeschätzt als bei den meisten Zeige-Techniken. Dies ist ebenfalls bei *Go-Go + PRISM* der Fall, hier kann der zusätzliche physische Aufwand aber auch in der schwierigen Kontrolle des Cursors begründet liegen. Einschränkend muss aber gesagt werden, dass auch die auf der Zeige-Geste basierenden Techniken *Scaled HOMER* und *Bimanual Fishing Reel + Scale* im Mittel erhöhte physische Anforderungen aufwiesen. Da diese Techniken keine Disambiguierung verwenden, war es mit diesen Techniken anstrengend, Objekte mit kleiner visueller Größe auszuwählen. Hier wurde der Arm meist lange Zeit ausgestreckt, was diesen ermüden kann (Hincapié-Ramos et al., 2014) und hier vermutlich neben den vielen kleinen korrigierenden Bewegungen zu einer höheren physischen Belastung geführt hat.

A6: *Eine isomorphe Abbildungsfunktion fördert die Natürlichkeit einer Technik, wodurch auf Erfahrungen aus der Realität zurückgegriffen werden kann. (LaViola et al., 2017; Mendes et al., 2019; Mine et al., 1997)*

A7: *Techniken mit einer isomorphen Abbildungsfunktion können physisch anspruchsvoller sein. (Bowman, 2002; Mendes et al., 2019)*

A8: *Die Möglichkeit, zwei anstatt einer Hand zu verwenden, kann sich positiv auf die Usability auswirken, da eine natürliche Interaktion möglich ist und auf*

die Erfahrungen mit zweihändiger Interaktion aus dem Alltag zurückgegriffen werden kann. (Buxton & Myers, 1986; Hinckley et al., 1994; Kabbash et al., 1994; LaViola et al., 2017)

Der positive Effekt einer isomorphen Abbildungsfunktion lässt sich vor allem auf die Propriozeption zurückzuführen, wodurch eine direkte Form der Interaktion möglich ist und man sich eher auf das Körpergefühl anstatt auf visuelles Feedback verlassen kann (Mine et al., 1997). In der Manipulationsstudie war dieser Effekt zu beobachten und die Testpersonen konnten insbesondere die Techniken *Simple Virtual Hand* und *Spindle* ohne viel Übung und Nachdenken nutzen. Dies ist auch an den subjektiven Bewertungen der Testpersonen erkennbar. In der Selektionsstudie wurden die Techniken mit einer isomorphen Abbildungsfunktion allerdings als physisch fordernder eingeschätzt. Durch die Zweihändigkeit von *Spindle* kann ein positiver Effekt bei der Manipulation von Objekten vermutet werden und einige Testpersonen merkten hier an, gerne beide Hände verwenden zu wollen, wenn eine Technik nur eine Hand unterstützte. Einschränkend ist zu sagen, dass die Aufgabe hier einen Einfluss zu haben scheint. So wurde *Spindle* in der Selektionsstudie teilweise schlechter bewertet als in der Manipulationsstudie und auch die Kommentare der Testpersonen weisen daraufhin, dass diese *Spindle* für die Selektion zu aufwändig fanden.

A9: *Eine nicht-isomorphe Abbildungsfunktion kann Einschränkungen aus der Realität aufbrechen. (LaViola et al., 2017; Mendes et al., 2019)*

A10: *Eine skalierte Abbildungsfunktion kann zu einem unvorhersehbaren Verhalten der Technik führen. (König et al., 2009; Osawa, 2006)*

A11: *Eine skalierte Rotation kann Clutching entgegenwirken und die Performance im Allgemeinen verbessern. (LaViola et al., 2017; Poupyrev et al., 2000)*

Die Techniken *Spindle* und *Simple Virtual Hand* ermöglichten aufgrund ihrer isomorphen Abbildungsfunktion ausschließlich die Interaktion mit Objekten im Aktionsradius der Testperson, so wie es auch aus der Realität bekannt ist. Techniken, die eine nicht-isomorphe Abbildungsfunktion verwenden, wie *Scaled HOMER* und *Go-Go + PRISM*, ermöglichten dagegen die Vergrößerung der Reichweite und auch die Selektion und Manipulation von Objekten auf große Distanz. Die Abbildungsfunktion muss allerdings passend umgesetzt werden und kann andernfalls zu einem unvorhersehbaren Verhalten führen, wie es bei *Go-Go + PRISM* zu beobachten war. Die Studienergebnisse lassen zudem darauf schließen, dass die skalierte Rotation von *Scaled HOMER + Scale* zu einer besseren Performance als mit *Scaled HOMER* geführt hat. Insbesondere war dies bei den Zeiten der Aufgaben zu erkennen, die die Rotation eines Objekts beinhalten, wo das Objekt vermutlich weniger häufig erneut gegriffen werden musste.

A12: *Bei Aufgaben, die nur eine Teilmenge der möglichen Transformation erfordern, kann es die Aufgabe erleichtern und die Präzision erhöhen, wenn eine getrennte Ausführung der Transformation ermöglicht wird. (Hinckley et al., 1994; Mendes et al., 2016)*

A13: *Die Notwendigkeit, zwischen mehreren Modi zu wechseln, kann zusätzliche Zeit kosten und zu kognitivem Mehraufwand führen. (König et al., 2009; Mendes et al., 2019)*

A14: *Die Verwendung von zusätzlichen Buttons kann die Natürlichkeit einer Technik verringern und den mentalen Aufwand erhöhen, aber die Ermüdung des Arms verringern. (Bowman, 2002)*

Die *Spindle* Technik ermöglichte ausschließlich die gleichzeitige Durchführung der Positionierung, Rotation und Skalierung, was zur Folge hatte, dass es für die Testpersonen z.B. nahezu unmöglich war, die Größe eines Objektes unverändert zu lassen, auch wenn die Skalierung kein Teil der Aufgabe war. Bei *Bimanual Fishing Reel + Scale* war dagegen die getrennte Durchführung von Positionierung, Rotation und Skalierung möglich, wodurch die Eigenschaften des Objekts unabhängig voneinander geändert werden konnten, was auch die ermittelten Präzisionswerte widerspiegeln. Die mittleren Zeiten der Technik deuten allerdings darauf hin, dass der Wechsel zwischen den Modi und die Verwendung von Buttons zusätzliche Zeit gekostet haben. Darüber hinaus konnte beobachtet werden, dass öfters die falschen Buttons gedrückt wurden. Die subjektiven Einschätzungen deuten ebenfalls auf einen erhöhten mentalen Aufwand und eine geringe Natürlichkeit hin. Allerdings wurde der Technik im Mittel bei der Manipulation von Objekten auch ein geringerer physischer Aufwand bescheinigt, was vermutlich auf die Verwendung von Buttons zurückzuführen ist. Bei *Crank Handle* war der Wechsel in den falschen Modus noch häufiger zu beobachten, da hier das Drücken des Buttons innerhalb einer bestimmten Zeitspanne darüber entschied, in welchen Modus gewechselt wurde. Bei *Crank Handle* war es ebenfalls möglich, die Rotation unverändert zu belassen, wenn nur die Positionierung erforderlich war. So konnte in einfachen Szenarien, wo das Objekt nur positioniert werden musste, die Drehung des Objekts beibehalten werden.

A16: *Die Verwendung von Verweilzeit zur Selektion eines Objektes führt zu einem zusätzlichen Zeitaufwand. (Argelaquet & Andujar, 2013; Sanz, 2011)*

A17: *Das Drücken eines Buttons zum Selektieren oder Loslassen eines Objekts kann zum Heisenberg Effekt führen, wodurch sich die Position des Selektionswerkzeugs oder des gehaltenen Objekts verändern kann. (Argelaquet & Andujar, 2013; Bowman, Wingrave et al., 2001)*

Bei der *Head Based Selection* war durch die schlechteren Zeiten selbst in einfachen Szenarien der Einfluss der verwendeten Verweilzeit zur Selektion von Objekten erkennbar. Diese war hier mit einer Sekunde relativ hoch, wodurch aber der Midas Touch Effekt verhindert werden konnte und nahezu keine fehlerhaften Selektionen auftraten. Das Drücken eines Buttons hat dagegen in der Selektionsstudie insbesondere bei Techniken, die einen Lichtstrahl verwenden, und bei Objekten mit einer kleinen visuellen Größe zu einer hohen Anzahl fehlerhafter Selektionen geführt. Neben der allgemein hohen Präzision, die hier nötig ist, um das Objekt auf dem Objekt zu halten, konnte beobachtet werden, wie sich die Position des Lichtstrahls veränderte, sobald der Button zur Selektion gedrückt wurde. Dies wurde so auch von einigen Testpersonen kommuniziert.

A18: *Die Performance, Usability und User Experience einer Technik hängen stark von der durchzuführenden Aufgabe ab. (LaViola et al., 2017; Poupyrev et al., 1997)*

Die ausgewählten unabhängigen Variablen hatten teilweise einen starken Einfluss auf die gemessene Zeit und Präzision bei der Durchführung der Aufgabe. Bei der Selektion sorgten insbesondere kleinere Objekte auf größerer Distanz bei einigen Techniken für Probleme, wobei andere Techniken hier weniger Schwierigkeiten hatten. Bei der Manipulation hatten vor allem der Aufgabentyp und der Manipulationsgrad einen starken Einfluss auf die Performance der Techniken. Auch zwischen den Teilstudien waren Unterschiede in der Nutzbarkeit der Techniken erkennbar und der Einfluss des Aufgabentyps verdeutlicht. So wurde *Spindle* in der Selektionsstudie noch als eher ungeeignet bewertet, während sie in der Manipulationsstudie als eine der besten Techniken eingeschätzt wurde.

4.7.2 Hypothesengenerierung

Anstatt eine hypothesengeleitete Untersuchung durchzuführen, wurde sich dafür entschieden, neue Hypothesen aus den Ergebnissen der Studie herzuleiten. Der hierdurch mögliche explorative Charakter der Studie erlaubte den Vergleich einer Vielzahl verschiedener Interaktionstechniken in unterschiedlichen Szenarien. Die im Folgenden aufgestellten Hypothesen zeigen den Vorteil einer auf einer Taxonomie basierenden Untersuchung von Interaktionstechniken und das Forschungspotenzial im Bereich der 3D-Interaktion, insbesondere bezüglich der gezielten Erweiterung bestehender Techniken um einzelne Merkmale. Hierauf kann eine weiterführende Forschung aufbauen.

H1: *Die Rotation von Objekten auf größerer Distanz wird bei der Scaled HOMER Technik durch die Nutzung eines Lichtstrahls und das daraus resultierende häufigere Clutching erschwert.*

In der durchgeführten Studie war bei *Scaled HOMER* zu beobachten, dass durch die Selektion von Objekten mit einem Lichtstrahl die anschließende Rotation von diesem erschwert wurde. In diesem Szenario muss die Hand nach vorne zeigen und nach der Selektion bleibt nicht mehr viel Spielraum für das Handgelenk, um das Objekt zu drehen. Dies führt entsprechend zum Clutching und das Objekt muss mehrmals gegriffen und gedreht werden, um die Zielrotation zu erreichen. Auf kurzer Distanz konnte das Objekt meist noch seitlich anvisiert und ausgewählt werden, wodurch nach der Selektion ein größerer Spielraum für die Drehung des Handgelenks übrig blieb. Diese Problematik wird in bisherigen Studien zu Varianten der *HOMER* Technik (siehe z.B. Pierce und Pausch (2002); Wilkes und Bowman (2008)) nicht beleuchtet, weshalb die Hypothese *H1* aufgestellt wurde. Um diese Hypothese zu überprüfen, könnte die *Scaled HOMER* Technik auf kurze und hohe Entfernung getestet werden, wobei insbesondere die benötigte Zeit und die Anzahl an erneuten Selektionen miteinander verglichen werden sollten.

H2: *Die skalierte Abbildungsfunktion für die Rotation von Objekten bei Scaled HOMER + Scale verringert das Clutching und führt damit bei Aufgaben, die*

die Rotation erfordern, zu einer schnelleren Interaktion und besseren Usability im Vergleich zur Scaled HOMER Technik.

Die mittleren Zeiten der *Scaled HOMER + Scale* Technik lassen insbesondere in Szenarien eine schnellere Interaktion im Vergleich zu *Scaled HOMER* vermuten, wo nur die Rotation notwendig war. Dies kann vermutlich auf die skalierte Rotation zurückgeführt werden, wodurch das Clutching möglicherweise reduziert und die Performance verbessert wurde (LaViola et al., 2017; Poupyrev et al., 2000). Allerdings wurde nicht gezielt überprüft, wie oft das Objekt neu gegriffen wurde und ob das Clutching tatsächlich reduziert wurde. Eine weiterführende Studie könnte die beiden Techniken miteinander vergleichen und gezielt das Clutching untersuchen. Auch könnte in einer dedizierten Vorstudie die Stärke der Skalierung der Rotation gezielter eingestellt werden.

H3: *Die Erweiterung der Scaled HOMER + Scale Technik um eine einstufige (heuristische oder verhaltensbasierte) Disambiguierung führt zu einer schnelleren und weniger fehleranfälligen Selektion und Manipulation bei Objekten mit einer kleinen visuellen Größe.*

Disambiguierung stellte sich in der Selektionsstudie als wichtiger Faktor heraus, um nicht nur die Selektion eines Objekts unter mehreren zu ermöglichen, sondern auch um die Selektion von kleinen und einzelnen Objekten zu vereinfachen. Die Erweiterung durch eine einstufige heuristische oder verhaltensbasierte Disambiguierung aus bestehenden Techniken könnte sich positiv auf viele der getesteten Techniken auswirken. So könnten die wenigen, aber durchgängig auftretenden fehlerhaften Selektionen bei der *Simple Virtual Hand* Technik reduziert werden und die empfundene Arbeitslast bei den auf einem Lichtstrahl basierenden Techniken ohne Disambiguierung verbessert werden. Für die Hypothese *H3* wurde *Scaled HOMER + Scale* als Vertreter der Techniken, die einen Lichtstrahl verwenden, ausgewählt und könnte durch die Disambiguierung von *IntenSelect* erweitert werden. Dies könnte die vielen Fehler bei Objekten mit einer kleinen visuellen Größe und die körperliche Anstrengung stark reduzieren und die Technik insgesamt beschleunigen. Auch bei Manipulationsaufgaben könnte dies die Performance der Technik verbessern, da beim Clutching das erneute Greifen des Objekts unterstützt wird.

H4: *Eine kleinere Skalierungskonstante in der Abbildungsfunktion für die Positionierung bei Scaled HOMER (+ Scale) führt zu besseren Zeiten und einer höheren Usability der Technik.*

Insbesondere die erhobenen subjektiven Daten suggerieren, dass die Skalierungskonstante in der Abbildungsfunktion für die Positionierung bei den *Scaled HOMER* Techniken zu hoch war, was zu einer zu starken Verlangsamung bei langsamen Bewegungen geführt hat. Aus diesem Grund wurde die Hypothese *H4* aufgestellt. Um diese Hypothese zu überprüfen, sollten mehrere Varianten der *Scaled HOMER* Technik mit jeweils anderen Skalierungskonstanten bei der Durchführung von Positionierungsaufgaben hinsichtlich benötigter Zeit und Usability verglichen werden.

H5: *Die bei Scaled HOMER + Scale verwendete Skalierung durch die Distanz zwischen den Controllern erlaubt eine schnellere und einfachere Skalierung von Objekten auch auf größerer Distanz als die Skalierung durch Buttons bei Bimanual Fishing Reel + Scale.*

Die mittleren Zeiten von *Scaled HOMER + Scale* bei Aufgaben, in denen nur die Skalierung nötig war, und die Kommentare der Testpersonen lassen die Vermutung zu, dass eine Veränderung der Objektgröße durch die Distanz zwischen beiden Händen, die von der *Spindle* Technik adaptiert wurde, schneller und einfacher funktioniert als eine Skalierung durch zwei Buttons wie bei *Bimanual Fishing Reel + Scale*. Diese beiden Techniken unterstützen die gleichen Aufgabentypen auf allen Distanzen und könnten in einer dedizierten Studie gegenübergestellt werden.

H6: *Das Drücken eines Triggers im Vergleich zu einem Button kann sich negativ auf die Präzision beim Selektieren oder Loslassen eines Objekts auswirken.*

In der Selektionsstudie wurde eine geringe, aber durchgängig vorhandene Anzahl an fehlerhaften Selektionen bei der *Simple Virtual Hand* Technik erfasst. Aufgrund von Beobachtungen wird vermutet, dass der Controller schon vereinzelt zurückgezogen wurde, bevor das Objekt überhaupt selektiert wurde, um schnell zur Ausgangsposition zurückzukehren. Der längere Weg des Triggers, verglichen mit einem normalen Button, könnte hieran schuld sein. Um dies zu untersuchen, wurde die Hypothese *H6* aufgestellt. Diese könnte überprüft werden, indem drei Varianten der *Simple Virtual Hand* Technik verglichen werden, bei denen die Selektionen mit einem normalen Button, bei geringer Veränderung des Triggers, oder beim vollständigen Durchdrücken des Triggers ausgelöst wird. Hierdurch könnte überprüft werden, ob der längere Weg des Triggers Auswirkungen auf die Selektion hat.

H7: *Ein zusätzlicher Button bei Spindle zur Aktivierung der Skalierung kann eine unabsichtliche Skalierung der Objektgröße verhindern, ohne dabei die Usability zu verringern.*

Die Erweiterung von *Spindle* durch eine optionale Aktivierung der Skalierung könnte dazu führen, dass Nutzende nicht versuchen müssten, die Objektgröße beizubehalten, wenn diese nicht verändert werden soll. Es wird vermutet, dass sich dies nicht negativ auf die Usability auswirkt, da momentan die Trigger beider Controller gedrückt und gehalten werden müssen, um das Objekt auszuwählen und anschließend manipulieren zu können. Die Erweiterung könnte so umgesetzt werden, dass das Objekt beim Betätigen des Triggers des Controllers in der dominanten Hand ausgewählt wird und die Skalierung nur aktiviert wird, wenn auch der Trigger des Controllers in der nicht-dominanten Hand zusätzlich gedrückt wird. Werden beide Trigger gedrückt, würde die angepasste Technik somit genauso funktionieren wie die aktuelle Technik, aber es bestünde zusätzlich die Möglichkeit der optionalen Deaktivierung der Skalierung.

H8: *In alltäglichen Szenarien erreicht die Scaled Scrolling Worlds in Miniature + Scale Technik langsamere Zeiten für die Manipulation von Objekten, als andere Techniken, die die Positionierung, Rotation und Skalierung von Objekten auf allen Distanz ermöglichen, wie z.B. Bimanual Fishing Reel + Scale oder Scaled HOMER + Scale.*

H9: *Scaled Scrolling Worlds in Miniature + Scale kann in speziellen Szenarien eine bessere Usability und User Experience erreichen als andere Techniken, die ebenfalls auf hoher Distanz funktionieren.*

H10: *Durch die Verkleinerung des Miniaturmodells in der Scaled Scrolling Worlds in Miniature + Scale Technik wird in der Regel eine geringere Präzision erreicht als mit Techniken, die keine Proxy-Objekten nutzen.*

Scaled Scrolling Worlds in Miniature + Scale war im Mittel bei nahezu jedem Aufgabentyp in der Manipulationsstudie unter den schnellsten Techniken, was aber vermutlich am Aufbau der Studie lag, wodurch die Zeitmessung erst startete, sobald das Objekt das erste mal ausgewählt wurde. So konnte der Ausschnitt im Miniaturmodell vorher angepasst und auch die Skalierungsgröße entsprechend vorher gewählt werden. Übrig blieb dann meist nur noch eine kurze Interaktion, die stark der Manipulation mit der *Simple Virtual Hand* Technik ähnelte und entsprechend schnell durchgeführt werden konnte. Es wird vermutet, dass in alltäglicheren Szenarien, wo z.B. Objekte in verschiedenen Arealen des virtuellen Raumes und in verschiedenen Größen manipuliert werden müssen, insgesamt mehr Zeit benötigt wird als mit Techniken wie *Bimanual Fishing Reel + Scale* oder *Scaled HOMER + Scale*. Hier würde *Scaled Scrolling Worlds in Miniature + Scale* vermutlich durch das ständige Verschieben des Ausschnitts und der Vergrößerung und Verkleinerung des Miniaturmodells mehr Zeit benötigen. Dennoch lässt die Studie einen Vorteil der Technik in speziellen Szenarien vermuten. Das Miniaturmodell erlaubt die einfache Betrachtung der Umgebung und der Objekte aus verschiedenen Blickwinkeln, was insbesondere auf größeren Distanzen sonst schwer möglich ist. Es wird deshalb angenommen, dass die Technik in Szenarien von Vorteil ist, wo die Ausrichtung von Objekten relativ zu anderen eine wichtige Rolle spielt, wie z.B. der Einrichtung einer virtuellen Wohnung. Anhand der erfassten Präzisionswerte in der Studie kann allerdings auch vermutet werden, dass sich die Verkleinerung durch das Miniaturmodell negativ auf die erreichbare Präzision bei der Manipulation von Objekten auswirkt.

H11: *Eine direkte Skalierung eines ausgewählten Objekts ist einfacher und schneller als die indirekte Skalierung durch die Vergrößerung und Verkleinerung des Miniaturmodells in der Scaled Scrolling Worlds in Miniature + Scale Technik.*

H12: *Eine bessere Skalierbarkeit der Miniaturwelt in der Scaled Scrolling Worlds in Miniature + Scale Technik kann die Usability der Technik verbessern.*

H13: *Die Möglichkeit, das Miniaturmodell in der Scaled Scrolling Worlds in Miniature + Scale Technik schweben zu lassen, kann die Usability der Technik verbessern.*

Die für die Studie entwickelte Technik *Scaled Scrolling Worlds in Miniature + Scale* lässt einige Schwächen vermuten, denen durch Anpassungen entgegengewirkt werden kann. In

weiterführenden Studien könnte die Wirksamkeit dieser Änderungen evaluiert werden. So empfanden einige Testpersonen die indirekte Skalierung eines Objekts durch die Vergrößerung und Verkleinerung des Miniaturmodells, während das Objekt gehalten wird, als ungewöhnlich. Eine direkte Vergrößerung des gegriffenen Objekts, ohne dabei die Größe des Miniaturmodells zu ändern, könnte eine intuitivere Interaktion ermöglichen. Auch merkten einige Testpersonen an, dass die Skalierung auf dem Touchpad zu sensibel umgesetzt wurde. Eine Anpassung dieser Funktion oder Übersetzung auf zwei Buttons, durch die vergrößert oder verkleinert werden kann, wie bei der *Bimanual Fishing Reel + Scale* Technik, könnte sich hier positiv auswirken. In der Studie fiel außerdem auf, dass die Controller in einigen wenigen Fällen zusammenstießen und das Modell oft sehr nah zum Kopf geführt wurde. Eine Möglichkeit, dem entgegenzuwirken und den Kopf einfacher an das Miniaturmodell heranzuführen zu können, wäre das von Stoakley et al. (1995) bereits für die originale *World in Miniature* Technik erdachte Schweben des Miniaturmodells. Hierfür würde es sich anbieten, durch das Drücken oder Loslassen des Triggers des Controllers in der nicht-dominanten Hand das Miniaturmodell zu greifen oder loszulassen, wenn der Controller dieses berührt. Ein schwebendes Miniaturmodell würde auch weiterhin die Möglichkeit unterstützen, die Objekte unabhängig von der Entfernung einfach aus verschiedenen Blickwinkeln betrachten zu können, was bereits in der Studie intensiv von den Testpersonen genutzt wurde. Die Möglichkeit, das Miniaturmodell von der nicht-dominanten Hand zu lösen, könnte auch weiter gedacht werden und eine zweihändige Manipulation des Miniaturmodells und der Objekte angelehnt an die *Spindle* Technik ermöglicht werden, wenn das Miniaturmodell schwebt.

H14: *Eine optionale Invertierung der Drehung eines Objekts kann die indirekte Rotation von Objekten für einige Nutzende verbessern.*

Sowohl bei den *Scaled HOMER* Techniken als auch bei *Bimanual Fishing Reel + Scale* konnten bei einigen Testpersonen Probleme bei der korrekten Rotation von Objekten beobachtet werden. Die Techniken haben gemein, dass die Drehung der Hand auf das Objekt übertragen wird, ohne dass dieses direkt an der Hand befestigt ist. Einige Testpersonen merkten an, dass sich das Objekt andersherum bewegen würde, als sie es erwarten würden. Möglicherweise liegt hier eine Nutzerpräferenz zugrunde, die aus der Kontrolle eines Avatars in einem Computerspiel aus der Ego-Perspektive bekannt ist. Hier besteht in vielen Spielen die Möglichkeit, die Y-Achse zu invertieren, wenn die Steuerung über eine Maus oder einen Joystick auf dem Gamepad erfolgt. Die genauen Gründe hierfür sind noch unerforscht, aber Vorerfahrungen oder die Präferenz für das Agieren aus einem Avatar oder einer externen Kamera heraus können hierbei Faktoren sein (Stuart, 2020). Die Möglichkeit der Invertierung einer oder mehrerer Achsen könnte somit auch die indirekte Drehung von Objekten für einige Nutzende verbessern.

H15: *Zweihändige Techniken mit einer isomorphen Abbildungsfunktion eignen sich nicht für die ausschließliche Selektion.*

Das schlechtere Abschneiden von *Spindle* bei allen subjektiven Bewertungen in der Selektionsstudie im Vergleich zur Manipulationsstudie lässt vermuten, dass *Spindle* ungeeignet

für die ausschließliche Selektion von Objekten ist. Bei der Sortierung der Techniken landete *Spindle* bei der Selektion noch auf dem vorletzten Platz, aber bei der Manipulation auf dem ersten. Dies deckt sich mit den Aussagen der Testpersonen, die es zu aufwändig fanden, beide Hände zum Objekt führen zu müssen, nur um dieses auszuwählen. Es wird vermutet, dass dies auch auf ähnliche zweihändige Techniken mit isomorpher Abbildungsfunktion wie *Handle Bar* zutrifft. Indizien dafür, dass einhändige Techniken im Allgemeinen bevorzugt werden, lassen sich aus der Studie nicht ableiten. Zwar gaben einige wenige Testpersonen an, dass *Scaled Scrolling World in Miniature + Scale* zu komplex für die ausschließliche Selektion sei, anhand der gemessenen objektiven und subjektiven Werte lässt sich aber keine unterschiedliche Eignung für die Selektion oder Manipulation ableiten.

H16: *Wird der Button, der für die Selektion eines Objekts verwendet wird, auch für den Wechsel zwischen verschiedenen Modi auf Basis einer Zeitspanne verwendet, führt dies häufiger zur Auswahl des falschen Modus, als wenn ein dedizierter Button verwendet wird.*

Bei der ausschließlichen Positionierung eines Objekts mit der *Crank Handle* Technik konnte ab einem höheren Manipulationsgrad beobachtet werden, dass die Testpersonen oft versehentlich in den Rotationsmodus wechselten, obwohl sie das Objekt nur verschieben wollten. Dies liegt daran, dass bei der Technik der Rotationsmodus aktiviert wird, wenn man innerhalb von 0.6 Sekunden, nachdem das Objekt losgelassen wurde, den Trigger erneut drückt. Da die Testpersonen das Objekt aber schnell bewegen wollten, betätigten sie den Trigger oft zu früh. Dieser versehentliche Wechsel ist auch an den Präzisionswerten bzgl. der Rotation in diesen Szenarien erkennbar. Es wird vermutet, dass die Verwendung eines dedizierten Buttons für den Wechsel zwischen den Modi für weniger fälschliche Wechsel sorgt. In der originalen *Crank Handle* Technik wird die komplette Hand erfasst und kein Controller verwendet. Da hier kein zusätzlicher Button zur Verfügung steht, wurde aus diesem Grund vermutlich die Geste des Greifens doppelt belegt. Wahrscheinlich tritt hier aber ein ähnliches Problem auf wie bei der Verwendung eines Buttons und eine weitere Geste könnte genutzt werden, um den Modus eindeutig zu unterscheiden, wie bei der Technik *Asymmetric Bimanual Gestural Interface* (Lévesque et al., 2013).

H17: *Eine neu zugeordnete Abbildungsfunktion auf Basis von Proxy-Objekten erlaubt eine schnellere Interaktion bei einer besseren Usability im Vergleich zu der Abbildung einer rotierenden Bewegung auf die Rotation eines Objekts.*

Die bereits mehrfach angesprochenen Probleme bei der Rotation eines Objekts mit der *Crank Handle* Technik sind vermutlich auf die notwendigen kreisförmigen Bewegungen zurückzuführen. Dabei handelt es sich um eine neu zugeordnete Abbildungsfunktion, wo die Position des Controllers auf die Rotation des Objekts abgebildet wird. Auch die Technik *Scaled Scrolling World In Miniature + Scale* nutzt eine neu zugeordnete Abbildungsfunktion, wobei aber Proxy-Objekte verwendet werden, deren Position und Rotation auf die eigentlichen Objekte abgebildet werden. Die Ergebnisse der Studie lassen vermuten, dass diese Form der Neuabbildung schneller funktioniert und allgemein zu einer höheren Usability führt.

4.7.3 Schlussfolgerung

Mit der Studie sollte der Frage nachgegangen werden, welche Randbedingungen durch die Eigenschaften von Selektions- und Manipulationstechniken hinsichtlich ihrer Anwendung spezifiziert werden. Um möglichst viele Eigenschaften und Anwendungsszenarien betrachten zu können, wurde ein exploratives Studiendesign gewählt. Insgesamt wurden 12 Interaktionstechniken in verschiedenen Aufgaben miteinander verglichen, in denen Objekte selektiert, positioniert, rotiert oder skaliert werden mussten. Dabei wurden bei der Selektion die Größe, Entfernung und Dichte der Objekte variiert und bei der Manipulation die durchzuführende Aufgabe, die Entfernung und der Manipulationsgrad. Erfasst wurden die benötigte Zeit, die erreichte Präzision sowie subjektive Faktoren hinsichtlich der Usability, der Arbeitslast und der User Experience. Die Techniken wurden so ausgewählt, dass möglichst viele der Dimensionen der entwickelten Taxonomie abgedeckt werden.

Die Ergebnisse der explorativen Studie ermöglichten es, Aussagen aus anderen Arbeiten und Ergebnisse vorangegangener Studien zu stützen. So waren in der Studie vor allem die Vorteile von Disambiguierung und einer isomorphen Abbildungsfunktion erkennbar. Die Studie lässt aber auch vermuten, dass sich die Eigenschaften einer Interaktionstechnik unterschiedlich stark auf die Performance in verschiedenen Szenarien auswirken. So war es schwer, einen Einfluss der verwendeten Metapher in den getesteten Aufgaben festzustellen und andere Eigenschaften hatten hier größere Auswirkungen. Die Verwendung einer neu zugeordneten Abbildungsfunktion funktionierte z.B. bei der Verwendung von Proxy-Objekten in der *Scaled Scrolling World In Miniature + Scale* Technik gut, während die Veränderung der Rotation eines Objektes auf Basis der Position des Controller bei *Crank Handle* viele Probleme bereitete. Insbesondere aus derartigen Beobachtungen konnten neue Hypothesen generiert werden, die in weiterführenden Studien betrachtet werden können. So wird z.B. auch vermutet, dass die distanzbasierte Skalierung von Objekten im Allgemeinen zu besseren Zeiten führt als die Skalierung mit Hilfe von Buttons. Die weitere Untersuchung der Hypothesen könnte zu einer Anpassung der Taxonomie führen, wenn sich z.B. herausstellt, dass die Neuordnung mit Hilfe von Proxy-Objekten stark von der Abbildung von der Position auf die Rotation abweicht.

Auch konnten anhand der für die Studie entwickelten Techniken *Scaled Scrolling World In Miniature + Scale* und *Scaled HOMER + Scale* Hinweise darauf gefunden werden, dass die Erweiterung von bestehenden Techniken um spezifische Eigenschaften die Interaktion in bestimmten Szenarien verbessern kann. Die erstellte Taxonomie kann dabei helfen, diese Eigenschaften zu identifizieren. Die Untersuchung der in diesem Zusammenhang aufgestellten Hypothesen könnte zu der Umsetzung von Techniken führen, die in einer Vielzahl von Szenarien anwendbar sind.

Es ist schwierig, die hier im Fokus stehende Teilfrage vollständig zu beantworten. Der gewählte explorative Ansatz erlaubte es nicht, eigenständige und validierte Aussagen zu den Dimensionen der Taxonomie zu treffen. Es konnten allerdings bestehende Erkenntnisse unterstützt und neue Hypothesen aufgestellt werden. Ein alternativer Ansatz hätte darin bestehen können, gezielt eine Dimension durch den Vergleich einer kleinen Anzahl an Interaktionstechniken in einigen wenigen Anwendungsszenarien zu untersuchen. Hierbei hätten durch inferenzstatistische Verfahren valide Aussagen getroffen werden können, aber eben nur zu einem kleinen Ausschnitt der Taxonomie.

Kapitel 5

Webbasiertes Unterstützungssystem und weitere Ergebnisse

Die entwickelte Taxonomie und die Erkenntnisse aus der Studie können die Auswahl von passenden Interaktionstechniken unterstützen. Für die Zielgruppe der Entwickelnden von VR-Anwendungen ist es aber schwierig, die Ergebnisse direkt anzuwenden und es muss eine Möglichkeit gefunden werden, wie die Resultate zugänglich und nutzbar gemacht werden können. Dieses Kapitel soll sich mit der Frage auseinandersetzen, wie die Ergebnisse der Arbeit verwendet werden können, um Entwickelnde von VR-Anwendungen gezielt und auf eine einfache Art und Weise bei der Auswahl von Interaktionstechniken zu unterstützen. Dafür wird im Folgenden eine Webanwendung vorgestellt, die es ermöglicht, Techniken auf Basis der erstellten Taxonomie zu filtern oder unter Verwendung der Ergebnisse der Studie zu sortieren. Die im Rahmen der Arbeit entwickelte Software und die erhobenen Daten können für Entwickelnde und Forschende von Interesse sein, weshalb auf deren Veröffentlichung abschließend in diesem Kapitel ebenfalls eingegangen wird.

5.1 S3DIT

Die in Kapitel 2.4.2 präsentierten Hilfsmittel stellen sinnvolle Mechanismen dar, um bei der Gestaltung der Interaktion in VR-Anwendungen zu unterstützen. Diese zielen allerdings in erster Linie darauf ab, den möglichen Gestaltungsraum einzuschränken. Richtlinien können Hinweise darauf geben, worauf bei der Gestaltung der Interaktion zu achten ist und welche Arten von Interaktionstechniken bevorzugt werden sollten. Die in Frage kommenden Techniken müssen aber schon vorher bekannt sein. Auch für die automatische Auswahl und Adaption von Techniken müssen die nutzbaren Techniken zuvor gezielt ausgewählt worden sein. Die angesprochenen Unterstützungssysteme sind in erster Linie aufbereitete und besser nutzbare Richtlinien und ermöglichen ebenfalls nicht das gezielte Finden von Interaktionstechniken. Es fehlt somit an Hilfsmitteln, die den Gestaltungsraum und die damit einhergehenden Möglichkeiten der Interaktion in VR sichtbar machen. Aufgrund der Vielzahl von über die Zeit entstandenen Interaktionstechniken ist es für Entwickelnde von VR-Anwendungen schwer, einen Überblick über die existierenden

Filtern der Techniken
<ul style="list-style-type: none"> - die gesammelten Interaktionstechniken werden auf eine übersichtliche Weise dargestellt - die Techniken können auf Basis ihrer Eigenschaften gefiltert werden - mehrere Techniken sind hinsichtlich ihrer Eigenschaften vergleichbar
Detailansicht
<ul style="list-style-type: none"> - eine ausführliche Beschreibung der Techniken ist einsehbar - alle Eigenschaften einer Technik werden dargestellt - Bilder zur Visualisierung der Techniken können angezeigt werden - die Quellen der Bilder werden angegeben - die in der Studie erreichten objektiven und subjektiven Mittelwerte einer Technik können angezeigt werden - wissenschaftliche Arbeiten zu einer Technik und/oder Anwendungen, in denen die Technik verwendet wird, werden aufgelistet
Sortieren der Techniken
<ul style="list-style-type: none"> - die Techniken aus der Studie sind auf Basis der dort getesteten Szenarien sortierbar - die Szenarien für die Sortierung sind mit Hilfe der unabhängigen Variablen der Studie spezifizierbar - die Optimierungskriterien für die Sortierung sind mit Hilfe der abhängigen Variablen der Studie spezifizierbar
Weitere Funktionen
<ul style="list-style-type: none"> - der Zweck und die Bedienung der Anwendung werden erklärt - die zugrundeliegende Taxonomie wird erklärt - die Studie, aus der die Daten der Sortierung stammen, wird erklärt - weiterführende Literatur wird angegeben - weitere Interaktionstechniken können vorgeschlagen werden

Tabelle 5.1: Anforderungen an S3DIT.

Techniken zu erhalten. Aus diesem Grund wurde die Webanwendung *S3DIT*¹ (Selection of 3D Interaction Techniques) entwickelt. Diese ermöglicht das Filtern der Techniken auf Basis der Dimensionen und Unterdimensionen der Taxonomie und auch das Sortieren der in der Studie untersuchten Techniken anhand verschiedener Kriterien.

S3DIT baut auf eine Bachelorarbeit auf, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurde (Wullaert, 2019). Um den in Kapitel 2.4.2 genannten Problemen von Forschungssoftware entgegenzuwirken, ist sowohl die Anwendung selbst als auch der dokumentierte Source Code öffentlich zugänglich (siehe Kapitel 5.3) und es wird eine Verstetigung und langfristige Unterstützung der Anwendung angestrebt (siehe Kapitel 6.2). Vor der Umsetzung von S3DIT wurden Anforderungen definiert, die die Anwendung erfüllen sollte. Diese sind in Tabelle 5.1 aufgelistet und wurden aus Gründen der Übersichtlichkeit den folgenden Unterkapiteln zugeordnet, in denen die einzelnen Funktionalitäten von S3DIT beschrieben werden.

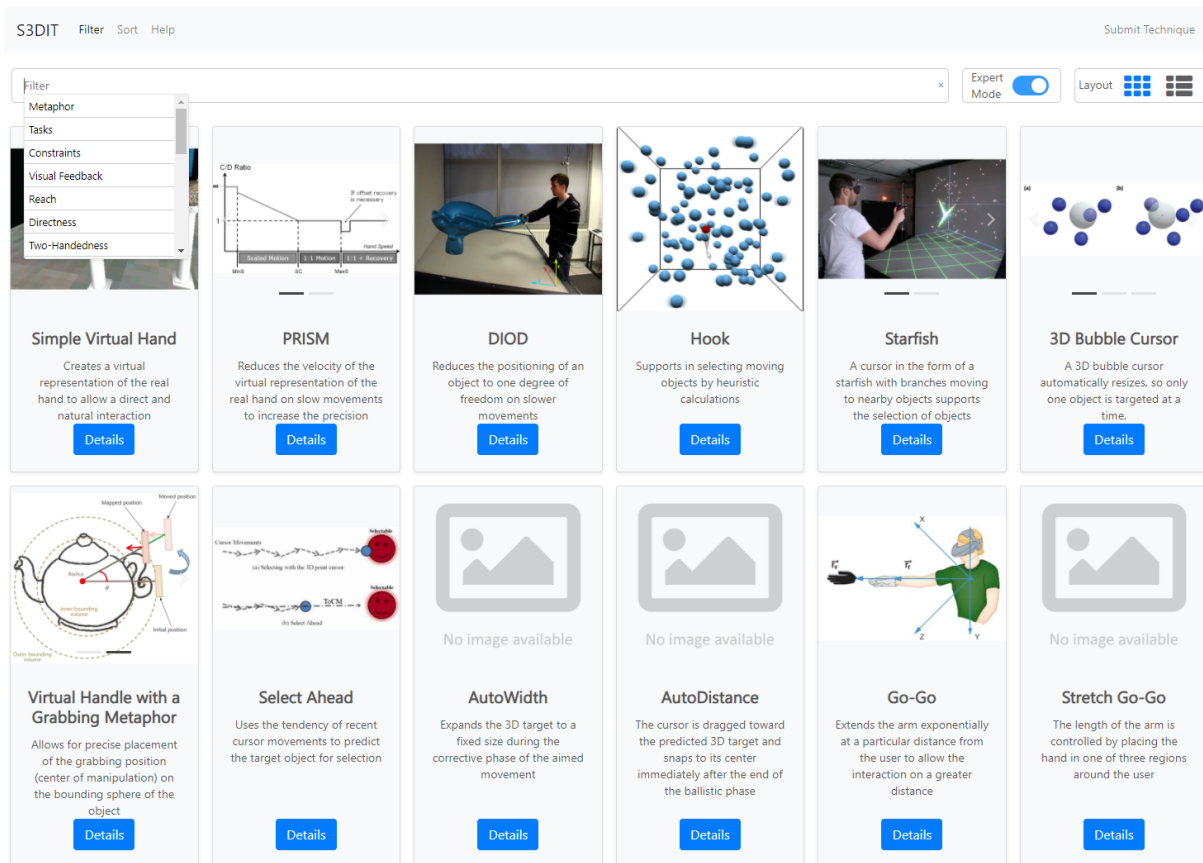


Abbildung 5.1: Hauptansicht von S3DIT.

5.1.1 Filtern der Techniken

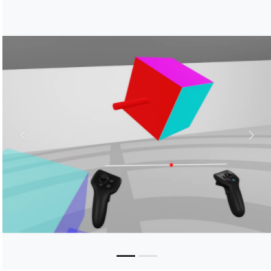
In der Hauptansicht, die in Abbildung 5.1 dargestellt ist, sind alle für die Arbeit betrachteten Techniken in Form von Kacheln aufgelistet. Die Kacheln enthalten, wenn möglich, ein oder mehrere Bilder zur Visualisierung der Techniken. Diese entstammen meist aus den entsprechenden Arbeiten, in denen die Techniken vorgestellt wurden, oder sind in einigen wenigen Ausnahmen selbst erstellt worden. Eine Kachel enthält außerdem immer den Namen der Technik, eine kurze Beschreibung und einen Button, über den man zur Detailansicht kommt (siehe Kapitel 5.1.2). Über den Kacheln befindet sich eine Eingabeleiste, über die die angezeigten Techniken gefiltert werden können. Hierfür kann aus einer Liste eine oder mehrere Unterdimensionen der Taxonomie ausgewählt werden. Anschließend lässt sich auswählen, ob Techniken mit oder ohne ein bestimmtes Merkmal der Unterdimension angezeigt werden sollen. So können die Anforderungen einer VR-Anwendung sehr feingranular spezifiziert werden, um passende Interaktionstechniken zu finden. Entwickelnde müssen das Szenario der VR-Anwendung also möglichst auf die Dimensionen der Taxonomie herunterbrechen. Beispielsweise kann angegeben werden, dass nur Techniken angezeigt werden sollen, die auf der Hand-Metapher basieren, aber trotzdem auf größerer Distanz eingesetzt werden können.

Es besteht allerdings die Gefahr, dass Entwickelnde, die zum ersten Mal mit diesem Werkzeug arbeiten oder keine Erfahrung mit den möglichen Eigenschaften einer Interaktions-

¹<https://s3dit.cs.uni-potsdam.de>, letzter Abruf 21.02.2021

S3DIT Filter Sort Help
Submit Technique

Spindle



The center between the two hands serves as the selection point. Pressing a button on both controllers simultaneously grabs the object. Moving the hands in the same direction positions the object, rotating the hands around each other rotates the object, and moving the hands apart or together scales the object. A rotation around the axis between both hands is not possible.

Property	Value		
Metaphor	Grasping/Hand-based		
Tasks	Selection Positioning Rotation Scaling		
Constraints	None		
Visual Feedback	3D cursor (point cursor)		
Reach	Arm-length		
Directness	Indirect		
Two-Handedness	Symmetric-synchron		
Input Device	Tracked Body Parts	First Hand Second Hand	
	Degree of Freedom	Minimum DoF	(x, y, z) (x, y, z)
		Maximum DoF	(x, y, z) (x, y, z)
	1D Input	2 Buttons (Selection)	
Transformation Separation	(P,R)z,S		
Mapping	Selection	isomorph	
	Positioning	isomorph	
	Rotation	Remapped	
	Scaling	Distance	

Results from studies

The following table shows the result of two studies where multiple interaction techniques were compared for a selection and a manipulation task. The needed time and accomplished accuracy were measured as well as usability and user experience factors. Details on the conducted study can be found on the [help page](#).

Implementation details of the technique: The implementation of the technique used in the study connects the two controllers with a white ray. The center of the ray marked with a small red sphere serving as the selection point. If this sphere touches an object, it can be selected by pressing the trigger of both controllers. While pressing the triggers moving the hands in the same direction positions the object, rotating the hands around each other rotates the objects, and moving the hands apart or together scales the object. A rotation around the axis between both hands is not possible. However, cycling movements with both controllers can be used to rotate the object around this axis.

Manipulation Objective	Selection Objective		Manipulation Subjective		Selection Subjective	
	Distance (m)	Manipulation Amount	Mean Time (s)	Precision Position (%)	Precision Rotation (%)	Precision Scale (%)
Positioning	0,6	Low	4,01	85,65	82,40	89,59
Positioning	0,6	Medium	7,05	86,74	83,48	91,22
Positioning	0,6	High	8,02	86,33	76,46	93,70
Rotating	0,6	Low	9,49	84,72	70,10	94,59
Rotating	0,6	Medium	12,80	79,06	72,56	88,68
Rotating	0,6	High	12,24	83,25	80,52	91,47
Scaling	0,6	Low	3,29	82,32	89,85	87,77
Scaling	0,6	Medium	3,74	77,80	87,54	81,98
Scaling	0,6	High	5,09	75,39	90,92	79,68
Positioning and Rotating	0,6	Low	9,01	82,21	68,52	89,58
Positioning and Rotating	0,6	Medium	10,74	82,59	71,43	90,86
Positioning and Rotating	0,6	High	12,19	80,05	67,94	89,57
Positioning, Rotating and Scaling	0,6	Low	8,80	80,70	76,52	88,47
Positioning, Rotating and Scaling	0,6	Medium	10,54	88,00	67,50	92,38
Positioning, Rotating and Scaling	0,6	High	13,47	74,01	74,62	82,31

Sources

A Two-Handed Interface for Object Manipulation in Virtual Environments
 3D User Interfaces: Theory and Practice, 2nd Edition
 Bild 1 (eigene Darstellung)
 Bild 2 (eigene Darstellung)

Go Back

Abbildung 5.2: Detailansicht einer Technik (aufgeteilt zur besseren Darstellung).

technik haben, mit den angebotenen Filtermöglichkeiten überfordert sind. Aus diesem Grund wurde ein Expertenmodus eingebaut, welcher standardmäßig deaktiviert ist. Nur wenn dieser aktiviert ist, sind die Techniken hinsichtlich aller Dimensionen der Taxonomie filterbar. Andernfalls stehen nur die Kategorien *Metapher*, *durchführbare Aufgaben*, *Reichweite*, *Zweihändigkeit*, *Erfasste Körperteile*, *1D Eingaben* und *Interaction Fidelity* zur Verfügung. Es wird angenommen, dass diese Kategorien einen guten Kompromiss aus Verständlichkeit und Wichtigkeit bilden. Es ist außerdem möglich, das Layout anzupassen, sodass die Techniken nicht als Kacheln, sondern in Form einer Tabelle angezeigt werden. In dieser Ansicht werden alle Merkmale der Techniken auf einmal dargestellt, weshalb nicht alle Informationen auf den Bildschirm passen und man nach rechts scrollen kann. Diese Ansicht sollte somit nur in Ausnahmefällen genutzt werden, um z.B. die Merkmale einer kleinen Anzahl an Techniken direkt gegenüberzustellen.

5.1.2 Detailansicht

Die Detailansicht kann über den entsprechenden Button in einer Kachel erreicht werden. Abbildung 5.2 zeigt die Detailansicht der Technik *Spindle*. Hier werden die Bilder zur Technik vergrößert angezeigt und eine ausführlichere Beschreibung wird gegeben. Anschließend werden alle Merkmale der Technik auf Basis der Dimensionen und Unterdimensionen der Taxonomie angegeben. Wurde die Technik in der vorgestellten Studie

S3DIT Filter Sort Help Submit Technique

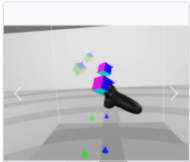
The suggestions are based on the results of an exploratory user study. More information on the study can be found on the [help page](#).

Step 1 Step 2 Result

—●— —●— —○—

Task:	Manipulation
Measurement Type:	Objective
Measurement:	Time
Sub Task:	Positioning and Rotating
Distance:	6 m
Manipulation Amount:	High

[Previous](#)

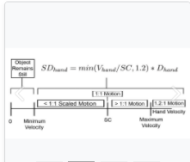


Scaled Scrolling World in Miniature + Scale

Allows the indirect interaction with the virtual objects through a miniature model (WIM). Additionally, it allows scaling and scrolling of the WIM and scaling of objects

[Details](#)

Mean Time: 7.17 Seconds

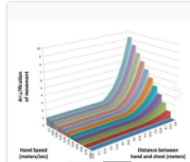


Scaled HOMER + Scale

Uses ray casting for selection and the Virtual Hand technique for manipulation. Additionally, scales translations to allow a more precise interaction and enables scaling of objects by the distance between the hands

[Details](#)

Mean Time: 14.62 Seconds




Go-Go + PRISM

Uses the Go-Go technique to extend the reach and PRISM to increase the precision

[Details](#)

Mean Time: 17.12 Seconds

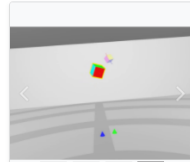


Bimanual Fishing Reel + Scale

Selection with a ray, positioning with the primary hand, changing distance and scale of the object with buttons and rotation with the secondary hand

[Details](#)

Mean Time: 19.40 Seconds




Scaled HOMER

Uses ray casting for selection and the Virtual Hand technique for manipulation. Additionally, scales translations to allow a more precise interaction

[Details](#)

Mean Time: 21.38 Seconds



Crank Handle (Controller)

Allows separated translation and rotation on each axis. Rotation is possible by rotating the hand around a primary axis like using a crank handle

[Details](#)

Mean Time: 24.12 Seconds

Abbildung 5.3: Zweistufiger Dialog für die Sortierung der Techniken auf Basis der Studienergebnisse.

verwendet, werden die Resultate der Technik in Form von Durchschnittswerten für alle erfassten Metriken sortiert nach unabhängigen Variablen dargestellt. Diese Werte sind mit Vorsicht zu betrachten, da keine zusätzlichen Informationen wie Standardabweichungen angegeben werden. Außerdem wird auf Details der Implementierung der Technik für die Studie eingegangen. Abschließend werden Quellen verlinkt, die zusätzliche Informationen zu den Techniken beinhalten oder aus denen die Bilder entnommen wurden.

5.1.3 Sortieren der Techniken

Das Werkzeug bietet die Möglichkeit, anhand der durchgeführten Studie die getesteten Techniken hinsichtlich verschiedener Kriterien zu sortieren. Hier sollte wieder bedacht werden, dass diese Sortierung alleinig auf den Durchschnittswerten angewendet wird und weitere Faktoren, wie z.B. die Varianzen in den Daten, nicht betrachtet werden. Hierauf wird auch in Form einer Infobox hingewiesen und auf die Hilfeseite verlinkt, auf der

weitere Informationen zur durchgeführten Studie gefunden werden können. Somit können die Nutzenden selbst entscheiden, inwieweit sie den Ergebnissen der Studie vertrauen möchten.

Um die Sortierung zu erhalten, müssen zwei Schritte durchgeführt werden. Im ersten Schritt werden die Aufgabe und der Messtyp angegeben. Damit wird festgelegt, ob die Daten aus der Selektions- oder Manipulationsstudie stammen sollen und ob die objektiv oder durch die Fragebögen erfassten Werte für die Sortierung herangezogen werden sollen. Bei Auswahl der objektiven Werte können im zweiten Schritt der konkrete Messwert und das Aufgabenszenario anhand der unabhängigen Variablen festgelegt werden. Bei der Selektion ist das die Zeit oder Anzahl an Fehlern und die Distanz, die Objektgröße und die Objektdichte. Bei der Manipulation ist das die Zeit und Präzision und die Teilaufgabe, die Distanz und der Manipulationsgrad. Sollen die Fragebögen verwendet werden, kann im zweiten Schritte zwischen Usability, Natürlichkeit, Spaß, Präzision, Geschwindigkeit, Motion Sickness, Arbeitslast, mentale Anforderungen, physische Anforderungen, Performance, Aufwand und Frustration ausgewählt werden. Anschließend werden die getesteten Techniken in Form von Kacheln hinsichtlich der angegebenen Kriterien absteigend sortiert, sodass die Technik, die am besten abgeschnitten hat, vorne steht. Unten auf den Kacheln ist der entsprechende Wert, nach dem sortiert wurde, für jede Technik angegeben. Über den Kacheln sind alle festgelegten Kriterien aufgelistet. Bei der Sortierung, die in Abbildung 5.3 zu sehen ist, wurde z.B. im ersten Schritt die Manipulationsstudie mit objektiven Messwerten ausgewählt. Im zweiten Schritt wurde die Zeit als Messwert ausgewählt und als unabhängige Variablen Positionierung und Rotation für den Aufgabentyp, 6 m für die Distanz und ein hoher Manipulationsgrad festgelegt.

5.1.4 Weitere Funktionen

Auf einer Hilfeseite werden alle Funktionalitäten des Werkzeugs erklärt. Außerdem werden hier alle Dimensionen der Taxonomie erläutert, da diese zur Filterung verwendet werden. Auch die durchgeführte Studie wird detailliert erklärt und alle Fragen, die den Testpersonen gestellt wurden, werden aufgelistet. Darüber hinaus wird auf Arbeiten verwiesen, wo weitere Informationen zur Taxonomie oder S3DIT selbst gefunden werden können.

Bei der Umsetzung der Webanwendung wurde versucht, diese möglichst zukunftssicher und nachhaltig zu gestalten. Aus diesem Grund ist es möglich, weitere Techniken einzuschicken, wofür eine kurze Erklärung sowie zusätzliche Literatur bzw. Anwendungen, wo diese Technik verwendet wird, angegeben werden sollten. Außerdem wurde der Quellcode der Anwendung veröffentlicht (siehe Kapitel 5.3). Die langfristige Unterstützung der Anwendung ist problematisch, wie bei vielen aus dem Wissenschaftskontext entstandenen Softwareartefakten. Auf die hierfür nötigen Schritte wird in Kapitel 6.2 eingegangen.

5.2 Automatische Aufgabengenerierung

Im Rahmen der Umsetzung der Testumgebung für die im Kapitel 4 vorgestellte Studie wurde eine Möglichkeit geschaffen, die durchzuführenden Aufgaben automatisch mithilfe

Base Settings

Task Name: Selection Task

Prefab: Big Ball

Target Prefab: Big Ball Target

Distance: 1

Radius: 3

TimeLimit: 30

File Path: C:/tasks.json

Selection Task Generation

Number of Objects: 1

Min Density: 1

Generate

Manipulation Task Generation

Positioning:

Rotating:

Scaling:

Needed DoFs: 1

Manipulation Amount: 1

Positioning Tolerance: 0.05

Rotating Tolerance: 15

Scaling Tolerance: 0.05

Generate

Add to File

Remove Generated Objects

Abbildung 5.4: Einstellungsmöglichkeiten bei der Aufgabengenerierung.

eines Dialogs zu generieren. Dabei ist es möglich, verschiedene Variablen anzupassen und die generierten Aufgaben direkt zu einer JSON-Datei hinzuzufügen. Diese kann dann von der VR-Anwendung geladen werden, in der die Aufgaben anschließend nach und nach durchlaufen werden. Dieser Prozess kann auch in anderen Studien für die Generierung von Aufgaben verwendet werden, weshalb im Folgenden auf die Einstellungsmöglichkeiten eingegangen werden soll.

Der Dialog kann in der Entwicklungsumgebung Unity aufgerufen werden und ist in drei Abschnitte unterteilt (siehe Abbildung 5.4). In den einzelnen Abschnitten können grundlegende Einstellungen, sowie die Einstellungen zur Selektion oder zur Manipulation, vorgenommen werden. In den grundlegenden Einstellungen ist es möglich, ein Aufgabenobjekt sowie ein Zielobjekt beliebig festzulegen. Bei den Manipulationen ist das Aufgabenobjekt das Objekt, welches so positioniert, rotiert und skaliert werden muss, dass es mit dem Zielobjekt übereinstimmt. Bei der Selektion ist das Zielobjekt das Objekt, welches ausgewählt werden muss, und die anderen Aufgabenobjekte dürfen nicht selektiert werden. Über die hier ausgewählten Objekte kann auch die Objektgröße festgelegt werden. Außerdem ist es möglich, die Entfernung sowie den Radius festzulegen, wodurch bestimmt wird, in welchem Bereich die Objekte generiert werden. Die Aufgabe wird in der angegebenen Datei unter dem definierten Aufgabennamen gespeichert.

Für die Selektionsaufgaben können zusätzlich entsprechend die Anzahl der Objekte und die minimal einzuhaltende Objektdichte angegeben werden. Für die Manipulationsaufgaben kann angegeben werden, ob die Positionierung, Rotation und/oder Skalierung durchgeführt werden muss. Der Manipulationsgrad ist in Form der nötigen Freiheitsgrade sowie der tatsächlichen Stärke der Manipulation einstellbar. Es ist außerdem möglich, die Toleranzen einzustellen, die eingehalten werden müssen, damit eine Lösung akzeptiert wird.

Der verwendete Algorithmus sowie die weiteren Bedingungen, die bei der Generierung der Aufgaben eingehalten werden, sind nicht Fokus dieser Arbeit. Für einen tieferen Einblick wird auf die Dokumentation der Anwendung verwiesen (siehe Kapitel 5.3).

5.3 Zugang zu Software und Daten

Die entwickelte Taxonomie, die Erkenntnisse aus der Studie und die darauf aufbauende Webanwendung S3DIT können einen direkten Mehrwert für Entwickelnde von VR-Anwendungen bieten. Im Rahmen dieser Arbeit sind allerdings weitere Artefakte entstanden, die Entwickelnden von VR-Anwendungen und Interaktionstechniken sowie Forschenden helfen können. Darüber hinaus gibt die Deutsche Forschungsgemeinschaft (2019) folgende Richtlinie vor: „As a rule, researchers make all results available as part of scientific/academic discourse. . . . Where possible and reasonable, this includes making the research data, materials and information on which the results are based, as well as the methods and software used, available and fully explaining the work processes. Software programmed by researchers themselves is made publicly available along with the source code.“ Demnach beinhaltet gute wissenschaftliche Praxis, dass wissenschaftliche Daten und entwickelte Software öffentlich zugänglich gemacht werden, um Transparenz, Reproduzierbarkeit und eine mögliche Weiterverwendung sicherzustellen. Aus diesen Gründen sollen auch die im Rahmen dieser Arbeit entstandenen Anwendungen und Daten veröffentlicht werden. Die erste Wahl wäre hier ein fachspezifischer Online-Speicherdienst, wo die Angabe passender Metadaten möglich ist. Da für Virtual Reality, 3D Interaktion oder Interaktionstechniken kein geeigneter Online-Speicherdienst existiert, wurde Zenodo² verwendet. Hier wurden Repositories für den Source Code der in der Studie verwendeten Testanwendung³ und die erhobenen anonymisierten Daten⁴ angelegt. Der Anwendung liegen die verwendeten Testszenarien in einer Konfigurationsdatei bei. Mit der Anwendung können außerdem weitere Testszenarien auf Basis verschiedener Kriterien, die sich nach den in der Studie verwendeten unabhängigen Variablen richten, generiert werden (siehe Kapitel 5.2). Die implementierten Interaktionstechniken können für Entwickelnde als Implementierungsbeispiel dienen und sind durch verschiedene Parameter konfigurierbar. Die erhobenen Daten werden in einem simplen CSV-Format zur Verfügung gestellt, um die Lesbarkeit durch Mensch und Maschine zu ermöglichen. Die Funktionalitäten der Anwendung und die Struktur der erhobenen Daten werden im Repository erklärt. Auch der Source Code von S3DIT wurde über Zenodo zur Verfügung gestellt⁵.

²<https://zenodo.org>, letzter Abruf 21.02.2021

³<https://zenodo.org/record/4172112>, letzter Abruf 21.02.2021

⁴<https://zenodo.org/record/4553165>, letzter Abruf 21.02.2021

⁵<https://zenodo.org/record/4292312>, letzter Abruf 21.02.2021

Kapitel 6

Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Kapitel sollen die Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick auf mögliche Erweiterungen der entwickelten Komponenten und sich anschließende Forschung gegeben werden.

6.1 Zusammenfassung

VR-Anwendungen ermöglichen insbesondere aufgrund der verschiedenen verwendbaren Ein- und Ausgabegeräte und der Dreidimensionalität eine Vielzahl verschiedener Formen der Interaktion, die über die Bedienung von Desktop-PCs, wie wir sie kennen, hinausgeht. Entwickelnde von VR-Anwendungen stehen vor der Herausforderung, passende Interaktionstechniken für das entsprechende Szenario der Anwendung auszuwählen. Mit der Frage, wie die Entwickelnden bei dieser Aufgabe unterstützt werden können, hat sich diese Arbeit auseinandergesetzt. Dazu sollten folgende drei Forschungsfragen beantwortet werden.

1. Welche Eigenschaften von Selektions- und Manipulationstechniken erlauben die Identifikation möglicher Einsatzszenarien der Techniken?
2. Welche Randbedingungen werden durch die Eigenschaften von Selektions- und Manipulationstechniken hinsichtlich ihrer Anwendung spezifiziert?
3. Wie kann ein System aussehen, das die Auswahl von passenden Selektions- und Manipulationstechniken für Anwendungen unterstützt, die auf 3D-Interaktion zurückgreifen?

Um in die Thematik einzuführen, wurden eingangs wichtige Konzepte der Interaktion im dreidimensionalen Raum erläutert. Außerdem wurde auf Einflussfaktoren eingegangen, die die Performance einer Technik prägen und es wurden Eignungskriterien besprochen, anhand derer sich die Vor- und Nachteile von Techniken bzgl. verschiedener Anwendungsszenarien erkennen lassen. Anschließend wurden die drei Forschungsfragen beantwortet, woraus sich die folgenden Ergebnisse der Arbeit ableiten lassen:

Ergebnis 1: Taxonomie für Interaktionstechniken Eine mehrdimensionale Taxonomie wurde erstellt, die es ermöglicht, Techniken hinsichtlich einer Vielzahl von Merkmalen zu analysieren und zu klassifizieren. Bei der Entwicklung der Taxonomie wurde ein iterativer Prozess durchlaufen, bei dem nach und nach Dimensionen hinzugefügt oder ausgearbeitet wurden. Ausgangspunkt waren bestehende Taxonomien und Klassifikationen, welche kombiniert und erweitert wurden. Im Laufe des Entstehungsprozesses wurden stetig neue Interaktionstechniken identifiziert, die zur Validierung der Taxonomie herangezogen wurden. Letztendlich entstand eine Sammlung von 114 Interaktionstechniken, die in die Taxonomie einsortiert wurden, um deren Generalität und Granularität zu optimieren. Die finale Taxonomie besteht aus 12 Dimensionen, die sich in weitere Unterdimensionen aufteilen und es ermöglichen, Techniken bestimmte Merkmale zuzuordnen. So kann festgestellt werden, in welchen Eigenschaften sich die Techniken unterscheiden und eine erste Eignung für bestimmte Anwendungsszenarien abgeleitet werden. Die Taxonomie beschreibt außerdem den Gestaltungsraum für die untersuchten Techniken und kann somit die Entwicklung neuer oder die Anpassung existierender Techniken unterstützen.

Ergebnis 2: Erstellung einer VR-Anwendung für den Vergleich von Interaktionstechniken Um Selektions- und Manipulationstechniken vergleichen zu können, wurde eine VR-Anwendung entwickelt, deren Quellcode öffentlich zugänglich gemacht wurde. Hierüber wird auch ermöglicht, die durchzuführenden Aufgaben automatisch auf Grundlage verschiedener Einstellungen, wie der Aufgabenobjekte und der Objektdistanz, zu generieren. Die Anwendung kann somit als Basis für weitere Studien verwendet werden, in denen die Performance von Interaktionstechniken hinsichtlich verschiedener unabhängiger und abhängiger Variablen überprüft werden sollen.

Ergebnis 3: Vergleich ausgewählter Interaktionstechniken und Generierung von Hypothesen Eine explorative Studie wurde durchgeführt, in der eine Vielzahl von Interaktionstechniken miteinander verglichen wurde. Die Techniken wurden so ausgewählt, dass eine möglichst hohe Anzahl an Merkmalen, die aus der Taxonomie hervorgehen, abgedeckt wird. Als unabhängige Variablen wurden, unter anderem auf Basis einer systematischen Literaturanalyse, Aufgaben- und Umgebungsparameter identifiziert, die eine hohe Relevanz für gängige Anwendungsszenarien aufweisen. Auch die erfassten Messwerte und die Fragebögen wurden so gewählt, dass die Performance der Techniken hinsichtlich einer Vielzahl relevanter Kriterien verglichen werden kann. Die Ergebnisse der Studie wurden mit existierenden Studien in Verbindung gesetzt und es wurden Rückschlüsse auf die Dimensionen der Taxonomie gezogen. Abschließend wurden Aussagen und Ergebnisse vorangehender Studien mit den Resultaten der Studie unterstützt und neue Hypothesen aufgestellt, die in weiterführenden Studien untersucht werden können.

Ergebnis 4: Webanwendung zum Filtern und Sortieren von Interaktionstechniken Eine Webanwendung namens S3DIT wurde umgesetzt, die es ermöglicht, Techniken auf Basis der erstellten Taxonomie zu filtern und anhand der Resultate der durchgeführten Studie zu sortieren. Der Filter ermöglicht die Auswahl einer oder mehrerer Eigenschaften, die auf den Merkmalen der Taxonomie basieren. Es kann entschieden werden, ob die angezeigten Techniken die Eigenschaften enthalten sollen oder nicht. Eine Detailansicht

gibt eine ausführliche Beschreibung zu den Techniken, sowie Bilder und die detaillierte Einordnung der Technik hinsichtlich der Taxonomie. Auch die Ergebnisse der Studie werden angezeigt, wenn die Technik dort getestet wurde, und es wird auf weitere Quellen verwiesen. Die Sortierung der Techniken basiert auf den unabhängigen und abhängigen Variablen der Studie, über die ein Anwendungsszenario definiert werden kann. Über einen einfachen Algorithmus werden die Techniken anhand der erreichten Mittelwerte der ausgewählten abhängigen Variablen sortiert. Weitere Techniken können ebenfalls eingereicht werden. Die Webanwendung ermöglicht somit einen einfachen Zugang zu den Ergebnissen der Arbeit und kann so auch die Zielgruppe der Entwickelnden von VR-Anwendungen erreichen.

6.2 Ausblick

Die entwickelte Taxonomie, die durchgeführte Studie und die umgesetzte Webanwendung stellen sinnvolle Hilfsmittel für die Auswahl von passenden Interaktionstechniken dar. Im Zuge der Arbeit wurden allerdings weitere Fragestellungen aufgeworfen und es entstanden Ideen für Weiterentwicklungen der Komponenten, auf die im Folgenden eingegangen werden soll.

Erweiterung der Taxonomie

Durch die entwickelte Taxonomie ist es möglich, über S3DIT Techniken einfach auf Grundlage ihrer Eigenschaften zu finden. Techniken sollten aber nicht zwangsläufig als Gesamtkomponente angesehen werden, die vollständig in einer Anwendung übernommen werden muss. Vielmehr können Aspekte von Techniken adaptiert werden, um bestehende Interaktionsmechanismen in einer Anwendung zu verbessern. Diese von Wingrave (2009) als Flavors bezeichneten Variationen werden bereits teilweise von der Taxonomie durch die ableitbaren Merkmale unterstützt. Allerdings können schon kleine Unterschiede in den Techniken, wie z.B. verschiedene Formen der Hervorhebung von Zielobjekten (Baloup et al., 2019), einen Einfluss auf die Performance der Techniken haben. Die Granularität der Taxonomie könnte also beliebig erhöht werden, um z.B. auch die bereits angesprochenen Unterschiede in den Skalierungsfunktionen der Techniken *Adaptive Pointing* (König et al., 2009), *Smoothed Pointing* (Gallo & Minutolo, 2012) und *PRISM enhanced Ray-Casting* (Frees et al., 2007) abzudecken (siehe Kapitel 3.3.1). Dies würde sich entsprechend negativ auf die Komplexität der Taxonomie auswirken, kann aber die Entwicklung neuer oder die Anpassung existierender Interaktionstechniken unterstützen.

Die Natur einer Taxonomie ermöglicht des Weiteren das einfache Hinzufügen oder Verändern von Dimensionen und Merkmalen. So kann z.B. multisensorisches Feedback in Zukunft eine tragende Rolle bei der Umsetzung von Interaktionstechniken spielen, wenn die Technologie dies unterstützt. Zudem kann die Taxonomie leicht um Aspekte, wie die Auswahl mehrerer Objekte oder die kollaborative Interaktion, erweitert werden, die im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet werden konnten.

Durchführung weiterer Studien

Durch den explorativen Charakter der Studie konnte zwar eine Vielzahl von Techniken miteinander verglichen werden, doch war es so nicht möglich, eine hypothesengeleitete Studie durchzuführen. Mit Hilfe der Ergebnisse der Studie konnten allerdings mehrere Hypothesen generiert werden, die in weiterführenden Studien untersucht werden können. Dadurch könnten mögliche Änderungen oder Erweiterungen der Taxonomie identifiziert werden und die Eignung der für die Studie entwickelten Techniken für verschiedene Szenarien könnte weiter untersucht werden.

Verknüpfung verschiedener Studien

Die Sortierung von Interaktionstechniken, die mit S3DIT möglich ist, bezieht momentan nur die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Studie mit ein. Eine Möglichkeit, die Aussagekraft dieser Sortierung zu erhöhen und mehr Anwendungsszenarien als Sortierkriterien zu ermöglichen, wäre die Einbeziehung weiterer Studien. In Kapitel 4.6 wurden die Studienergebnisse bereits mit den Resultaten aus anderen Studien in Verbindung gesetzt. Dies ist aber nur begrenzt möglich, da hier ähnliche Probleme wie in einer Meta-Studie auftreten. Nicht alle Informationen, die nötig sind, um die Ergebnisse nachzustellen, werden bereitgestellt (Wingrave & Bowman, 2005) und die gesammelten Daten werden oftmals nicht zur Verfügung gestellt (Vines et al., 2014). Zudem erschwert die schnelle Entwicklung der VR-Systeme die Aussagekraft vergangener Studien, wie Bowman, Gabbard und Hix (2002) gut beschreiben: „It is tempting to over-generalize the results of evaluations of VE interaction performed in a generic (nonapplication) context. However, because of the fast-changing and complex nature of VEs, one cannot assume anything (display type, input devices, graphics processing power, tracker accuracy, and so on) about the characteristics of a real VE application.“ Unterschiedliche unabhängige und abhängige Variablen anderer Ein- und Ausgabegeräte und andere Umsetzungsformen von Aufgaben erschweren somit den Vergleich unter mehreren Studien.

Um weitere Studien bei der Sortierung mit S3DIT einzubeziehen, müssten diese sorgfältig ausgewählt werden, um eine Vergleichbarkeit zu erreichen und die gesammelten Daten müssten zugänglich sein. Auch könnten weitere Studien mit der für diese Arbeit entwickelten Testumgebung durchgeführt werden, um eine höhere Vergleichbarkeit zu erreichen. Hierfür müsste die Testumgebung allerdings entsprechend weiterentwickelt werden, was im folgenden Abschnitt beleuchtet wird. Eine etwas weniger umfängliche Möglichkeit, weitere Studien miteinzubeziehen, wäre die Darstellung der kumulierten Daten verschiedener Studien, die meist noch aus den entsprechenden wissenschaftlichen Arbeiten entnommen werden können. Diese könnten auf den Detailseiten der Techniken (siehe Kapitel 5.1.2) eingebunden oder auf einer extra Seite dargestellt werden, um mehrere Techniken in Beziehung setzen zu können. Somit könnte S3DIT einen schnellen Einblick in die Performance einer Technik im Vergleich zu anderen Techniken über verschiedene Studien hinweg ermöglichen. Aber auch hierfür müssten existierende Studien analysiert und aufbereitet werden, was jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht mehr möglich war.

Standardisierung der Testumgebung

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Testumgebung ermöglicht bereits die automatische Generierung von Testszenarien auf Basis vorher festgelegter unabhängiger Variablen (siehe Kapitel 5.2). Des Weiteren sind einige Interaktionstechniken implementiert, die über verschiedene Parameter anpassbar sind. Die in einer Studie zu verwendenden Techniken und Aufgaben sind darüber hinaus frei konfigurierbar und die Anwendung ermöglicht eine komfortable Steuerung des Studienablaufs für den/die Studienleiter/in. Auch die gesammelten Daten werden in einem einfach weiterzuverarbeitenden Datenformat abgespeichert. Diese Funktionalitäten stellen bereits eine solide Basis für die Weiterentwicklung der Anwendung hin zu einer standardisierten Testumgebung für den Vergleich von Interaktionstechniken dar. Dies würde die Vergleichbarkeit von entsprechenden Studien erhöhen. Eine Weiterentwicklung der Testumgebung in diese Richtung würde Möglichkeiten einschließen, neue Techniken und unabhängige sowie abhängige Variablen hinzuzufügen und auch die verwendeten Fragebögen sollten innerhalb der Anwendung verwaltbar gemacht werden.

Bestrebungen für derartige Testumgebungen gab es allerdings schon früher (siehe z.B. Domingues et al. (2010); Lampton et al. (1994); Poupyrev et al. (1997)). Aufgrund der fehlenden öffentlichen Zugänglichkeit, der Weiterentwicklung von Hard- und Software und der fehlenden weiteren Unterstützung ist eine Verwendung dieser Anwendungen und Frameworks nicht mehr möglich. Die Hoffnung ist, dass die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Testumgebung aufgrund der Veröffentlichung des Quellcodes und der Umsetzung in Unity zukunftssicherer ist. Unity wird auch in anderen Bereichen, wie der Spieleentwicklung und der Datenvisualisierung, intensiv verwendet und sollte somit auch langfristig unterstützt und weiterentwickelt werden.

Vorhersage der Performance einer Technik

Bowman (1999) hebt in seiner Arbeit den Nutzen eines Systems hervor, das so gestaltet sein könnte, dass es Entwickelnde, die nach einer passenden Interaktionstechnik suchen, Fragen zu der zu entwickelnden Anwendung stellt. Anhand dieser Fragen soll festgestellt werden, welche Aufgaben in der Anwendung durchgeführt werden müssen und auf welchen Performance-Kriterien (z.B. Geschwindigkeit oder Präzision) die höchste Priorität liegt. Hierfür sollen Daten zu den Techniken aus verschiedenen Studien genutzt werden, aus denen sich die Performance der Techniken in verschiedenen Anwendungsszenarien herleiten lässt. S3DIT macht erste Schritte in diese Richtung, indem die in der Studie getesteten Techniken auf Basis der Resultate hinsichtlich verschiedener Kriterien sortiert werden können (siehe Kapitel 5.1.3). Hierfür wird bisher ein sehr simpler Algorithmus verwendet, der die Techniken anhand der Mittelwerte der Ergebnisse sortiert und auch nur die getesteten Techniken miteinbezieht.

Bowman (1999) argumentiert, dass sich viele Techniken nur geringfügig unterscheiden und die Performance von ähnlichen Techniken vorhergesagt werden könnte. Anhand der Abbildung 6.1 soll ein entsprechender Algorithmus erläutert werden. Die Abbildung stellt eine Taxonomie dar, über die mögliche Merkmale (hier *Technique Component*) von Techniken definiert werden. Technik *A* besteht aus den Merkmalen 1 und 3, Technik *B* nutzt die

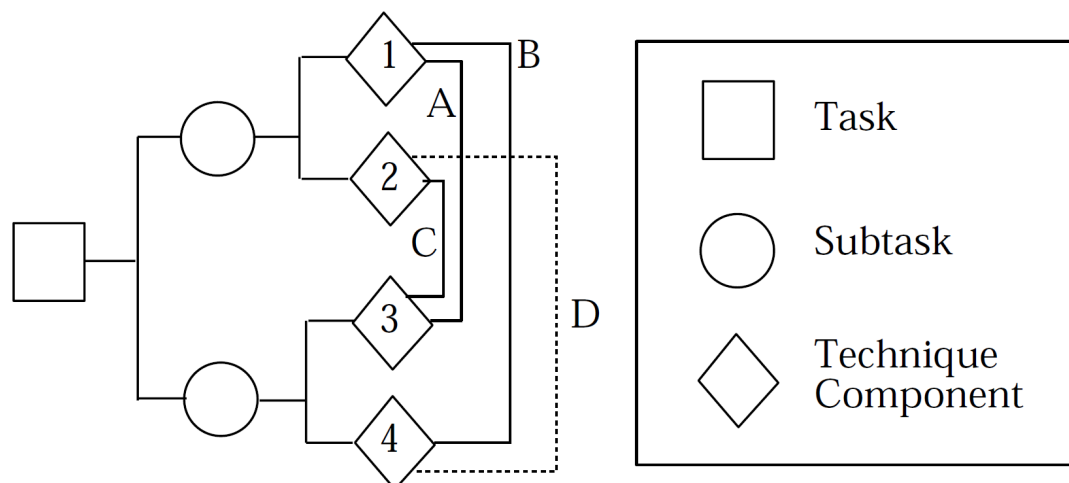


Abbildung 6.1: Herleiten der Performance einer Technik aus den Resultaten mehrerer Studien (Bowman, 1999).

Merkmale 1 und 4, und Technik *C* nutzt die Merkmale 2 und 3. Erreicht Technik *A* den Wert 5 hinsichtlich eines Performance-Kriteriums, Technik *B* den Wert 7.5 und Technik *C* den Wert 10, kann ein simpler Algorithmus die Performance von Technik *D* herleiten. Aus den Werten der Techniken *A* und *C* ergibt sich, dass Merkmal 2 für eine Verbesserung von 5 gegenüber Merkmal 1 sorgt. Somit kann der Wert von Technik *B* als Basis genommen werden und Technik *D* würde einen Wert von 12.5 erreichen. Bei komplexeren Studienresultaten könnten Regressions- oder andere Analyseverfahren verwendet werden, um eine entsprechende Vorhersage zu ermöglichen (Bowman, 1999).

Als Basis für diesen Ansatz kann die erstellte Taxonomie verwendet werden, allerdings wurde bereits in Kapitel 4.6 diskutiert, dass es nicht immer möglich ist, die Performance der Techniken auf bestimmte Merkmale zurückzuführen. Hierfür müsste demzufolge die Granularität der Taxonomie erhöht werden und gezielte Studien mit Techniken durchgeführt werden, die die entsprechenden Merkmale besitzen. Auch sind die Resultate von verschiedenen Studien oft schwer miteinander vergleichbar, worauf in diesem Kapitel bereits eingegangen wurde. Eine weitere Möglichkeit, diesen Ansatz zu unterstützen, wäre die angesprochene Durchführung weiterer Studien mit der gleichen Testumgebung, um eine höhere Vergleichbarkeit der Resultate zu erreichen.

Forschungsdatenmanagement

In Kapitel 5.3 wurde bereits auf die wichtige Rolle des Forschungsdatenmanagements eingegangen. Dies wäre eine spannende Richtung, in die S3DIT weiterentwickelt werden könnte. Um die Nachnutzung von Forschungsdaten sicherzustellen, werden in der Regel die *FAIR* Prinzipien (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable) (Wilkinson et al., 2016) als Richtlinien herangezogen, die in Abbildung 6.2 aufgelistet und ausgeführt sind. Es liegt in der Verantwortung der Forschenden, die Daten entsprechend aufzubereiten

To be Findable:

- F1. (meta)data are assigned a globally unique and persistent identifier
- F2. data are described with rich metadata (defined by R1 below)
- F3. metadata clearly and explicitly include the identifier of the data it describes
- F4. (meta)data are registered or indexed in a searchable resource

To be Accessible:

- A1. (meta)data are retrievable by their identifier using a standardized communications protocol
 - A1.1 the protocol is open, free, and universally implementable
 - A1.2 the protocol allows for an authentication and authorization procedure, where necessary
- A2. metadata are accessible, even when the data are no longer available

To be Interoperable:

- I1. (meta)data use a formal, accessible, shared, and broadly applicable language for knowledge representation.
- I2. (meta)data use vocabularies that follow FAIR principles
- I3. (meta)data include qualified references to other (meta)data

To be Reusable:

- R1. meta(data) are richly described with a plurality of accurate and relevant attributes
 - R1.1. (meta)data are released with a clear and accessible data usage license
 - R1.2. (meta)data are associated with detailed provenance
 - R1.3. (meta)data meet domain-relevant community standards

Abbildung 6.2: FAIR Prinzipien (Wilkinson et al., 2016).

und zur Verfügung zu stellen. Hierfür stehen bereits eine Vielzahl von Plattformen zur Verfügung, wie FigShare¹, Mendeley Data², Zenodo, DataHub³ und DANS⁴.

S3DIT sollte keine weitere Plattform werden, auf der Forschungsdaten zur Verfügung gestellt werden können. Vielmehr könnte S3DIT zu einer zentralen Anlaufstelle bzw. Frontend für Entwickelnde und Forschende weiterentwickelt werden, die Interaktionstechniken nutzen oder beforschen möchten und so die Auffindbarkeit der Daten nach den FAIR Prinzipien unterstützen. Die Daten aus Studien, in denen Interaktionstechniken verglichen werden, könnten mit den entsprechenden Techniken verknüpft werden, indem auf Repositories auf den genannten Plattformen verlinkt wird. Auch die genutzten Testumgebungen könnten über die Plattformen zur Verfügung gestellt werden und Implementierungsbeispiele für die getesteten Techniken liefern. Des Weiteren könnten aggregierte Daten in S3DIT aufbereitet werden, um gezielt Interaktionstechniken mit Studienergebnissen zu verknüpfen und Vor- und Nachteile von Techniken herauszustellen.

Evaluation und andere Weiterentwicklungen von S3DIT

Während der Entwicklung von S3DIT entstanden einige weitere Ideen für mögliche Verbesserungen der Webanwendung, auf die im Folgenden eingegangen werden kann. Momentan

¹<https://figshare.com>, letzter Abruf 21.02.2021

²<https://data.mendeley.com>, letzter Abruf 21.02.2021

³<https://datahub.io>, letzter Abruf 21.02.2021

⁴<https://dans.knaw.nl>, letzter Abruf 21.02.2021

werden die Techniken nur durch Bilder visualisiert. Eine weitere Möglichkeit wäre die Einbindung oder Verlinkung von Videos. Auch Implementierungsbeispiele, wie sie z.B. bei vrguideline.org (siehe Kapitel 2.4.2) angeboten werden, könnten über S3DIT zur Verfügung gestellt werden. Der Code sollte aber auf entsprechende Plattformen wie GitHub⁵ ausgelagert werden.

Auch könnte auf ähnliche Techniken verwiesen werden, die ebenfalls für das gewünschte Anwendungsszenario passen. Dies kann auf einfache Art und Weise durch die Taxonomie bestimmt werden. Ähnliche Techniken sind entsprechend Techniken, die sich in nur wenigen Merkmalen unterscheiden.

Die in Kapitel 2.4.2 angesprochenen Richtlinien könnten ebenfalls über S3DIT zugänglich gemacht und mit den Interaktionstechniken in Verbindung gesetzt werden. Hier könnte sich eine ähnliche Filtermöglichkeit, wie für die Interaktionstechniken, anbieten, sodass Richtlinien gezielt für spezifische Anwendungsszenarien gefunden werden können.

Es sollte außerdem darauf hingearbeitet werden, S3DIT dauerhaft zugänglich zu machen und die Unterstützung und Weiterentwicklung sicherzustellen. Da dies auf Dauer nicht eigenständig geleistet werden kann, sollte eine Institution gefunden werden, die ebenfalls Interesse an der Weiterführung des Projekts hat. Wenn S3DIT weiter in Richtung Forschungsdatenmanagement entwickelt wird, könnte an dieser Stelle die sich in Entwicklung befindende nationale Forschungsdateninfrastruktur⁶ eine mögliche Anlaufstelle sein.

Eine Evaluation von S3DIT war im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich. Diese könnte Einblick in die spezifischen Bedürfnisse von Entwickelnden geben und eine gezieltere Unterstützung bei der Auswahl von Interaktionstechniken ermöglichen. Vorstellbar wäre z.B. die Durchführung von Experteninterviews nach einer angeleiteten Verwendung von S3DIT. Hierbei könnte auf die Granularität der Taxonomie eingegangen werden und ob die bei S3DIT zur Filterung zur Verfügung stehenden Eigenschaften tatsächlich dabei helfen, passende Interaktionstechniken für die eigenen Anwendungsszenarien zu finden. Insbesondere könnte darauf eingegangen werden, welche weitere Anforderungen S3DIT erfüllen müsste, um bei der Auswahl von Interaktionstechniken zu unterstützen. Schließlich könnte auch die Usability und User Experience der Anwendung erfragt werden.

⁵<https://github.com>, letzter Abruf 21.02.2021

⁶<https://nfdi.de>, letzter Abruf 21.02.2021

Literaturverzeichnis

- Accot, J. & Zhai, S. (2001). Scale effects in steering law tasks. In J. Jacko (Hrsg.), *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (S. 1–8). New York, NY: ACM. doi: 10.1145/365024.365027
- Achibet, M., Girard, A., Talvas, A., Marchal, M. & Lecuyer, A. (2015). Elastic-Arm: Human-scale passive haptic feedback for augmenting interaction and perception in virtual environments. In T. Höllerer (Hrsg.), *2015 IEEE virtual reality (VR 2015)* (S. 63–68). Piscataway, NJ: IEEE. doi: 10.1109/VR.2015.7223325
- Akoglu, H. (2018). User’s guide to correlation coefficients. *Turkish journal of emergency medicine*, 18 (3), 91–93. doi: 10.1016/j.tjem.2018.08.001
- Andujar, C. & Argelaguet, F. (2007a). Anisomorphic ray-casting manipulation for interacting with 2D GUIs. *Computers & Graphics*, 31 (1), 15–25. doi: 10.1016/j.cag.2006.09.003
- Andujar, C. & Argelaguet, F. (2007b). Virtual Pads: Decoupling Motor Space and Visual Space for Flexible Manipulation of 2D Windows within VEs. In W. Stürzlinger, Y. Kitamura & S. Coquillart (Hrsg.), *IEEE Symposium on 3D User Interfaces*. Piscataway, NJ: Institute of Electrical and Electronics Engineers. doi: 10.1109/3DUI.2007.340781
- Anthes, C., Garcia-Hernandez, R. J., Wiedemann, M. & Kranzlmüller, D. (2016). State of the art of virtual reality technology. In *2016 IEEE Aerospace Conference* (S. 1–19). Piscataway, NJ: IEEE. doi: 10.1109/AERO.2016.7500674
- Argelaguet, F. & Andujar, C. (2013). A survey of 3D object selection techniques for virtual environments. *Computers & Graphics*, 37 (3), 121–136. doi: 10.1016/j.cag.2012.12.003
- Argelaguet, F., Andujar, C. & Trueba, R. (2008). Overcoming eye-hand visibility mismatch in 3D pointing selection. In S. Feiner (Hrsg.), *Proceedings of the 2008 ACM symposium on Virtual reality software and technology* (S. 43). New York, NY: ACM. doi: 10.1145/1450579.1450588
- Auteri, C., Guerra, M. & Frees, S. (2015). Increasing Precision for Extended Reach 3D Manipulation. *International Journal of Virtual Reality (IJVR)*, 12 (1), 66–73.
- Bacim, F., Kopper, R. & Bowman, D. A. (2013). Design and evaluation of 3D selection techniques based on progressive refinement. *International Journal of Human-Computer Studies*, 71 (7-8), 785–802. doi: 10.1016/j.ijhcs.2013.03.003
- Balakrishnan, R. (2004). “Beating” Fitts’ law: virtual enhancements for pointing facilitation. *International Journal of Human-Computer Studies*, 61 (6), 857–874. doi: 10.1016/j.ijhcs.2004.09.002
- Baloup, M., Pietrzak, T. & Casiez, G. (2019). RayCursor: a 3D Pointing Facilitation Technique based on Raycasting. In *2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (S. 1–12). New York: ACM. doi: 10.1145/3290605.3300331

- Benford, S., Greenhalgh, C., Rodden, T. & Pycock, J. (2001). Collaborative virtual environments. *Association for Computing Machinery. Communications of the ACM*, 44 (7), 79.
- Boletsis, C. (2017). The New Era of Virtual Reality Locomotion: A Systematic Literature Review of Techniques and a Proposed Typology. *Multimodal Technologies and Interaction*, 1 (4), 24. doi: 10.3390/mti1040024
- Boring, S., Jurmu, M. & Butz, A. (2009). Scroll, tilt or move it. In M. Foth (Hrsg.), *Proceedings of the 21st Annual Conference of the Australian Computer-Human Interaction Special Interest Group* (S. 161). New York, NY: ACM. doi: 10.1145/1738826.1738853
- Borst, C. W. & Indugula, A. P. (2005). Realistic virtual grasping. In B. Fröhlich, H. Takemura & S. Julier (Hrsg.), *IEEE Virtual Reality 2005* (S. 91–320). Piscataway, N.J: IEEE. doi: 10.1109/VR.2005.1492758
- Bossavit, B., Marzo, A., Ardaiz, O., de Cerio, L. D. & Pina, A. (2014). Design Choices and Their Implications for 3D Mid-Air Manipulation Techniques. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 23 (4), 377–392. doi: 10.1162/PRES_a_00207
- Bowman, D. A. (1997). Interaction Techniques for Immersive Virtual Environments: Design, Evaluation, and Application. *Journal of Visual Languages and Computing* (10), 37–53.
- Bowman, D. A. (1999). *Interaction techniques for common tasks in immersive virtual environments* (Doktorarbeit). Georgia Institute of Technology, Georgia.
- Bowman, D. A. (2002). Principles for the design of performance-oriented interaction techniques. *Handbook of Virtual Environments*.
- Bowman, D. A., Badillo, B. & Manek, D. (2007). Evaluating the Need for Display-Specific and Device-Specific 3D Interaction Techniques: Virtual Reality. In R. Shumaker (Hrsg.), *Virtual reality*. Berlin: Springer.
- Bowman, D. A., Chen, J., Wingrave, C. A., Lucas, J., Ray, A., Polys, N. F., ... Ni, T. (2006). New Directions in 3D User Interfaces. *IJVR*, 5 (2), 3–14. doi: 10.20870/IJVR.2006.5.2.2683
- Bowman, D. A., Gabbard, J. L. & Hix, D. (2002). A Survey of Usability Evaluation in Virtual Environments: Classification and Comparison of Methods. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 11 (4), 404–424. doi: 10.1162/105474602760204309
- Bowman, D. A. & Hodges, L. F. (1997). An evaluation of techniques for grabbing and manipulating remote objects in immersive virtual environments. In A. van Dam (Hrsg.), *Proceedings of the 1997 symposium on Interactive 3D graphics*. New York, NY: ACM.
- Bowman, D. A. & Hodges, L. F. (1999). Formalizing the Design, Evaluation, and Application of Interaction Techniques for Immersive Virtual Environments. *Journal of Visual Languages & Computing*, 10 (1), 37–53.
- Bowman, D. A., Johnson, D. B. & Hodges, L. F. (1999). Testbed Evaluation of Virtual Environment Interaction Techniques. In D. Brutzman, H. Ko & M. Slater (Hrsg.), *Proceedings of the ACM symposium on Virtual reality software and technology* (S. 26–33). New York, NY: ACM. doi: 10.1145/323663.323667
- Bowman, D. A., Kruijff, E., LaViola, J. J. & Poupyrev, I. (2001). An Introduction to 3-D User Interface Design. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 10 (1), 96–108. doi: 10.1162/105474601750182342
- Bowman, D. A., Wingrave, C., Campbell, J. & Ly, V. (2001). *Using Pinch Gloves for both Natural and Abstract Interaction Techniques in Virtual Environments*.

- Bowman, D. A., Wingrave, C. A., Campbell, J. M., Ly, V. Q. & Rhoton, C. J. (2002). Novel Uses of Pinch Gloves™ for Virtual Environment Interaction Techniques. *Virtual Reality*, 6 (3), 122–129. doi: 10.1007/s100550200013
- Brooke, J. (1996). SUS-A quick and dirty usability scale. *Usability evaluation in industry*, 189 (194), 4–7.
- Buxton, W. (1983). Lexical and Pragmatic Considerations of Input Structures. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, 17 (1), 31–37. doi: 10.1145/988584.988586
- Buxton, W. & Myers, B. (1986). A study in two-handed input. *ACM SIGCHI Bulletin*, 17 (4), 321–326. doi: 10.1145/22339.22390
- Caputo, F. M., Emporio, M. & Giachetti, A. (2017). Single-Handed vs. Two Handed Manipulation in Virtual Reality: A Novel Metaphor and Experimental Comparisons. In *Proceedings of the Conference on Smart Tools and Applications in Computer Graphics* (S. 39–45). Goslar Germany, Germany: Eurographics Association. doi: 10.2312/STAG.20171225
- Card, S. K., Mackinlay, J. D. & Robertson, G. G. (1991). A morphological analysis of the design space of input devices. *ACM Transactions on Information Systems (TOIS)*, 9 (2), 99–122. doi: 10.1145/123078.128726
- Carmigniani, J., Furht, B., Anisetti, M., Ceravolo, P., Damiani, E. & Ivkovic, M. (2011). Augmented reality technologies, systems and applications. *Multimedia Tools and Applications*, 51 (1), 341–377. doi: 10.1007/s11042-010-0660-6
- Cashion, J., Wingrave, C. A. & LaViola, J. J. (2012). Dense and dynamic 3D selection for game-based virtual environments. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 18 (4), 634–642. doi: 10.1109/TVCG.2012.40
- Cashion, J., Wingrave, C. A. & LaViola, J. J. (2013). Optimal 3D selection technique assignment using real-time contextual analysis. In A. Lécuyer (Hrsg.), *2013 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)* (S. 107–110). Piscataway, NJ: IEEE. doi: 10.1109/3DUI.2013.6550205
- Chen, J. & Bowman, D. A. (2009). Domain-Specific Design of 3D Interaction Techniques: An Approach for Designing Useful Virtual Environment Applications. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 18 (5), 370–386. doi: 10.1162/pres.18.5.370
- Chen, M., Mountford, S. J. & Sellen, A. (1988). A study in interactive 3-D rotation using 2-D control devices. In R. J. Beach (Hrsg.), *Proceedings of the 15th annual conference on Computer graphics and interactive techniques* (S. 121–129). New York, NY: ACM. doi: 10.1145/54852.378497
- Chin, J. P., Diehl, V. A. & Norman, L. K. (1988). Development of an instrument measuring user satisfaction of the human-computer interface. In E. Soloway, D. Frye & S. B. Sheppard (Hrsg.), *Human factors in computing systems* (S. 213–218). New York, NY: Association for Computing Machinery. doi: 10.1145/57167.57203
- Cho, I. & Wartell, Z. (2015). Evaluation of a bimanual simultaneous 7DOF interaction technique in virtual environments. In R. Lindeman (Hrsg.), *2015 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)* (S. 133–136). Piscataway, NJ: IEEE. doi: 10.1109/3DUI.2015.7131738
- Cleff, T. (2011). *Deskriptive Statistik und moderne Datenanalyse: Eine computergestützte Einführung mit Excel, PASW (SPSS) und STATA* (2. Auflage Aufl.). Wiesbaden: Gabler. doi: 10.1007/978-3-8349-7071-8
- Cockburn, A., Quinn, P., Gutwin, C., Ramos, G. & Looser, J. (2011). Air pointing: Design and evaluation of spatial target acquisition with and without visual feedback.

- International Journal of Human-Computer Studies*, 69 (6), 401–414. doi: 10.1016/j.ijhcs.2011.02.005
- Cruz-Neira, C., Sandin, D. J. & DeFanti, T. A. (1993). *Surround-screen projection-based virtual reality: the design and implementation of the CAVE*. ACM. doi: 10.1145/166117.166134
- Csisinko, M. & Kaufmann, H. (2003). Towards a universal implementation of 3d user interaction techniques. *Applications of Mixed Reality*, 27 (3), 86.
- Dam, P., Braz, P. & Raposo, A. (2013). A Study of Navigation and Selection Techniques in Virtual Environments Using Microsoft Kinect®. In D. Hutchison, T. Kanade & J. Kittler (Hrsg.), *Virtual Augmented and Mixed Reality. Designing and Developing Augmented and Virtual Environments* (Bd. 8021, S. 139–148). Berlin/Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi: 10.1007/978-3-642-39405-8_17
- Dang, N.-T. (2007). A Survey and Classification of 3D Pointing Techniques. In *2007 IEEE International Conference on Research, Innovation and Vision for the Future* (S. 71–80). Piscataway, NJ: IEEE. doi: 10.1109/RIVF.2007.369138
- De Haan, G., Koutek, M. & Post, F. H. (2005). IntenSelect: Using Dynamic Object Rating for Assisting 3D Object Selection. In E. Kjemms (Hrsg.), *Proceedings of the 11th Eurographics conference on Virtual Environments*. Aire-la-Ville, Switzerland: Eurographics Association. doi: 10.2312/EGVE/IPT_EGVE2005/201-209
- Deng, C.-L., Geng, P., Hu, Y.-F. & Kuai, S.-G. (2019). Beyond Fitts’s Law: A Three-Phase Model Predicts Movement Time to Position an Object in an Immersive 3D Virtual Environment. *Human factors*, 61 (6), 879–894. doi: 10.1177/0018720819831517
- Deutsche Forschungsgemeinschaft. (2019). *Guidelines for Safeguarding Good Research Practice. Code of Conduct*. doi: 10.5281/ZENODO.3923602
- Deutsches Institut für Normung e.V. (März 2020). *Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 210: Menschzentrierte Gestaltung interaktiver Systeme* (Nr. 9241-210:2019). Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- Deutsches Institut für Normung e.V. (September 2018). *Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 11: Gebrauchstauglichkeit: Begriffe und Konzepte* (Nr. 9241-11:2018). Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- Dix, A. (2004). *Human-computer interaction* (3. Auflage Aufl.). Harlow: Pearson Prentice-Hall.
- Domingues, C., Otmane, S., Davesne, F. & Mallem, M. (2008). Creating 3D Interaction Technique empirical evaluation with the use of a knowledge database of interaction experiments. In *2008 Conference on Human System Interactions* (S. 170–175). IEEE / Institute of Electrical and Electronics Engineers Incorporated. doi: 10.1109/HSI.2008.4581428
- Domingues, C., Otmane, S. & Mallem, M. (2010). 3DUI-EF: Towards a Framework for Easy Empirical Evaluation of 3D User Interfaces and Interaction Techniques. *The International Journal of Virtual Reality*, 9 (1), 73–80.
- Dörner, R., Broll, W., Grimm, P. & Jung, B. (2013). *Virtual und Augmented Reality (VR / AR)*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi: 10.1007/978-3-642-28903-3
- Duval, T., Lecuyer, A. & Thomas, S. (2006). SkeweR: a 3D Interaction Technique for 2-User Collaborative Manipulation of Objects in Virtual Environments. In *3DUI 2006* (S. 69–72). Piscataway, N.J.: IEEE. doi: 10.1109/VR.2006.119
- Fitts, P. M. (1954). The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology*, 47 (6), 381–391.

- doi: 10.1037/h0055392
- Frees, S. (2010). Context-driven interaction in immersive virtual environments. *Virtual Reality*, 14 (4), 277–290. doi: 10.1007/s10055-010-0178-2
- Frees, S., Kessler, G. D. & Kay, E. (2007). PRISM interaction for enhancing control in immersive virtual environments. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, 14 (1), 2. doi: 10.1145/1229855.1229857
- Gabbard, J. L. (1997). *A taxonomy of usability characteristics in virtual environments* (Masterarbeit). Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Gallo, L. & Minutolo, A. (2012). Design and comparative evaluation of Smoothed Pointing: A velocity-oriented remote pointing enhancement technique. *International Journal of Human-Computer Studies*, 70 (4), 287–300.
- Goesele, M. & Stuerzlinger, W. (1999). Semantic Constraints for Scene Manipulation. In J. Zára (Hrsg.), *Proceedings of the 15th Spring Conference on Computer Graphics (SCCG-99)* (S. 140–146).
- Golombek, L. (2020). *Identifizierung von Kenngrößen des Implementierungsaufwands von VR-Interaktionstechniken* (Bachelorarbeit). Universität Potsdam, Potsdam.
- Grossman, T. & Balakrishnan, R. (2006). The Design and Evaluation of Selection Techniques for 3D Volumetric Displays. In *Proceedings of the 19th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology* (S. 3–12). New York, NY, USA: ACM. doi: 10.1145/1166253.1166257
- Hale, K. S. & Stanney, K. M. (Hrsg.). (2014). *Handbook of virtual environments: Design, implementation, and applications* (2nd ed. Aufl.). Hoboken: Taylor and Francis.
- Hannema, D. L. (2001). *Interaction in virtual reality* (Doktorarbeit). Universiteit van Amsterdam, Amsterdam.
- Hart, S. G. (2006). Nasa-Task Load Index (NASA-TLX); 20 Years Later. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 50 (9), 904–908. doi: 10.1177/154193120605000909
- Hart, S. G. & Staveland, L. E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research. In P. A. Hancock & N. Meshkati (Hrsg.), *Advances in Psychology : Human Mental Workload* (Bd. 52, S. 139–183). North-Holland. doi: 10.1016/S0166-4115(08)62386-9
- Hartson, R. & Pyla, P. S. (2012). *The UX book: Process and guidelines for ensuring a quality user experience*. Amsterdam: Morgan Kaufmann.
- Higgins, J. P., Li, T. & Deeks, J. J. (2020). Choosing effect measures and computing estimates of effect. In J. P. Higgins et al. (Hrsg.), *Cochrane Handbook for Systematic Reviews of Interventions version 6.1 (updated September 2020)* (S. 143–176). Cochrane. doi: 10.1002/9781119536604.ch6
- Hincapié-Ramos, J. D., Guo, X., Moghadasian, P. & Irani, P. (2014). Consumed endurance: A Metric to Quantify Arm Fatigue of Mid-Air Interactions. In M. Jones, P. Palanque, A. Schmidt & T. Grossman (Hrsg.), *32nd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems* (S. 1063–1072). New York, NY: Assoc. for Computing Machinery. doi: 10.1145/2556288.2557130
- Hinckley, K., Pausch, R., Goble, J. C. & Kassell, N. F. (1994). A survey of design issues in spatial input. In P. Szekely (Hrsg.), *Proceedings of the ACM Symposium on User Interface Software and Technology* (S. 213–222). New York, N.Y.: Association for Computing Machinery. doi: 10.1145/192426.192501
- Jackson, B., Jelke, B. & Brown, G. (2018). Yea Big, Yea High: A 3D User Interface for Surface Selection by Progressive Refinement in Virtual Environments. In K. Kiyoo-

- kawa (Hrsg.), *25th IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces* (S. 320–326). Piscataway, NJ: IEEE. doi: 10.1109/VR.2018.8447559
- Jacob, R. J. K. (1992). What you look at is what you get: Eye movement-based interaction techniques. In J. C. Chew, J. C. Carrasco & J. Carrasco Chew (Hrsg.), *Empowering people* (S. 11–18). Reading, MA: Addison-Wesley. doi: 10.1145/97243.97246
- Jacob, R. J. K., Leggett, J. J., Myers, B. A. & Pausch, R. (1993). Interaction styles and input/output devices. *Behaviour & Information Technology*, 12 (2), 69–79. doi: 10.1080/01449299308924369
- Jerald, J. (2016). *The VR book: Human-centered design for virtual reality* (1. Aufl., Bd. 8). San Rafael: Morgan & Claypool.
- Kabbash, P., Buxton, W. & Sellen, A. (1994). Two-handed input in a compound task. In B. Adelson (Hrsg.), *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (S. 417–423). New York, NY: ACM. doi: 10.1145/191666.191808
- Katerbow, M. & Feulner, G. (2018). *Handreichung Zum Umgang Mit Forschungssoftware*. Zenodo. doi: 10.5281/ZENODO.1172970
- Katzakis, N., Seki, K., Kiyokawa, K. & Takemura, H. (2013). Mesh-Grab and Arcball-3D. In S. Tripathi & A. Joshi (Hrsg.), *Proceedings of the 11th Asia Pacific Conference on Computer Human Interaction* (S. 129–136). ACM. doi: 10.1145/2525194.2525198
- König, W. A., Gerken, J., Dierdorf, S. & Reiterer, H. (2009). Adaptive Pointing – Design and Evaluation of a Precision Enhancing Technique for Absolute Pointing Devices. In T. Gross et al. (Hrsg.), *Human-computer interaction - INTERACT 2009* (Bd. 5726, S. 658–671). Berlin: Springer. doi: 10.1007/978-3-642-03655-2_73
- Kopper, R., Bacim, F. & Bowman, D. A. (2011). Rapid and accurate 3D selection by progressive refinement. In J. J. LaViola (Hrsg.), *IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI), 2011* (S. 67–74). Piscataway, NJ: IEEE. doi: 10.1109/3DUI.2011.5759219
- Kopper, R., Bowman, D. A., Silva, M. G. & McMahan, R. P. (2010). A human motor behavior model for distal pointing tasks. *International Journal of Human-Computer Studies*, 68 (10), 603–615. doi: 10.1016/j.ijhcs.2010.05.001
- Kulik, A. (2009). Building on realism and magic for designing 3D interaction techniques. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 29 (6), 22–33. doi: 10.1109/MCG.2009.115
- Lampton, D. R., Knerr, B. W., Goldberg, S. L., Bliss, J. P., Moshell, J. M. & Blau, B. S. (1994). The Virtual Environment Performance Assessment Battery (VEPAB): Development and Evaluation. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 3 (2), 145–157. doi: 10.1162/pres.1994.3.2.145
- Latta, J. N. & Oberg, D. J. (1994). A conceptual virtual reality model. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 14 (1), 23–29. doi: 10.1109/38.250915
- Laugwitz, B., Held, T. & Schrepp, M. (2008). *Construction and Evaluation of a User Experience Questionnaire* (Bd. 5298). Springer Berlin Heidelberg. doi: 10.1007/978-3-540-89350-9_6
- Laugwitz, B., Schrepp, M. & Held, T. (2006). Konstruktion eines Fragebogens zur Messung der User Experience von Softwareprodukten. In A. M. Heinecke & H. Paul (Hrsg.), *Mensch und Computer 2006: Mensch und Computer im Strukturwandel* (S. 125–134). München: Oldenbourg Verlag.
- LaViola, J. J., Kruijff, E., McMahan, R. P., Bowman, D. & Poupyrev, I. P. (2017). *3D user interfaces: Theory and practice*. Addison-Wesley Professional.

- Lerner, D., Wichmann, D. & Wegner, K. (2019). Virtual-Reality-Simulationstraining in der Notfallsanitäterausbildung. *retten!*, 8 (04), 234–237. doi: 10.1055/a-0820-8614
- Lévesque, J.-C., Laurendeau, D. & Mokhtari, M. (2013). An Asymmetric Bimanual Gestural Interface for Immersive Virtual Environments. In R. Shumaker (Hrsg.), *Virtual Augmented and Mixed Reality. Designing and Developing Augmented and Virtual Environments*. Berlin Heidelberg: Springer.
- Li, S. & Wang, H. (2018). Traditional literature review and research synthesis. In *The Palgrave handbook of applied linguistics research methodology* (S. 123–144). Springer.
- Liang, J. & Green, M. (1994). JDCAD: A highly interactive 3D modeling system. *Computers & Graphics*, 18 (4), 499–506. doi: 10.1016/0097-8493(94)90062-0
- Liu, L. & van Liere, R. (2009). Designing 3D Selection Techniques Using Ballistic and Corrective Movements. In *Joint Virtual Reality Conference of EGVE - ICAT - EuroVR* (S. 1–8).
- Lucas, J. F. (2005). *Design and evaluation of 3D multiple object selection techniques* (Masterarbeit). Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg.
- MacKenzie, I. S. (1992). Fitts' Law as a Research and Design Tool in Human-Computer Interaction. *Human-Computer Interaction*, 7 (1), 91–139. doi: 10.1207/s15327051hci0701_3
- MacKenzie, I. S. (1995). Input Devices and Interaction Techniques for Advanced Computing. In *Virtual Environments and Advanced Interface Design* (S. 437–470). USA: Oxford University Press, Inc.
- MacKenzie, I. S. & Isokoski, P. (2008). Fitts' throughput and the speed-accuracy tradeoff. In M. Burnett (Hrsg.), *The 26th Annual CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI 2008* (S. 1633). New York, NY: ACM. doi: 10.1145/1357054.1357308
- Mackinlay, J., Card, S. & Robertson, G. (1990). A Semantic Analysis of the Design Space of Input Devices. *Human-Computer Interaction*, 5 (2), 145–190. doi: 10.1207/s15327051hci0502_3_2
- Mapes, D. P. & Moshell, J. M. (1995). A Two-Handed Interface for Object Manipulation in Virtual Environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 4 (4), 403–416. doi: 10.1162/pres.1995.4.4.403
- Masliah, M. R. & Milgram, P. (2000). Measuring the allocation of control in a 6 degree-of-freedom docking experiment. In T. Turner (Hrsg.), *Proceedings of the SIGCHI conference on Human Factors in Computing Systems* (S. 25–32). New York, NY: ACM. doi: 10.1145/332040.332403
- McMahan, R. P. (2011). *Exploring the effects of higher-fidelity display and interaction for virtual reality games* (Doctoral thesis). Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA.
- McMahan, R. P., Gorton, D., Gresock, J., McConnell, W. & Bowman, D. A. (2006). Separating the effects of level of immersion and 3D interaction techniques. In M. Slater, Y. Kitamura, A. Tal, A. Amditis & Y. Chrysanthou (Hrsg.), *VRST Cyprus 2006* (S. 108). New York, N.Y: ACM Press. doi: 10.1145/1180495.1180518
- McMahan, R. P., Lai, C. & Pal, S. K. (2016). Interaction Fidelity: The Uncanny Valley of Virtual Reality Interactions. In S. Lackey & R. Shumaker (Hrsg.), *Virtual, augmented and mixed reality* (Bd. 9740, S. 59–70). Cham and Heidelberg: Springer. doi: 10.1007/978-3-319-39907-2_6
- Mendes, D., Caputo, A., Giachetti, A., Ferreira, A. & Jorge, J. A. P. (2019). A Sur-

- vey on 3D Virtual Object Manipulation: From the Desktop to Immersive Virtual Environments. *Computer Graphics Forum*, 38 (1), 21–45. doi: 10.1111/cgf.13390
- Mendes, D., Fonseca, F., Araujo, B., Ferreira, A. & Jorge, J. (2014). Mid-air interactions above stereoscopic interactive tables. In A. Lécuyer (Hrsg.), *2014 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)* (S. 3–10). Piscataway, NJ: IEEE. doi: 10.1109/3DUI.2014.6798833
- Mendes, D., Medeiros, D., Sousa, M., Cordeiro, E., Ferreira, A. & Jorge, J. A. (2017). Design and evaluation of a novel out-of-reach selection technique for VR using iterative refinement. *Computers & Graphics*, 67, 95–102. doi: 10.1016/j.cag.2017.06.003
- Mendes, D., Relvas, F., Ferreira, A. & Jorge, J. (2016). The benefits of DOF separation in mid-air 3D object manipulation. In D. Kranzlmüller & G. Klinker (Hrsg.), *Proceedings of the 22nd ACM Conference on Virtual Reality Software and Technology - VRST '16* (S. 261–268). New York, New York, USA: ACM Press. doi: 10.1145/2993369.2993396
- Meyer, D. E., Abrams, R. A., Kornblum, S., Wright, C. E. & Smith, J. E. (1988). Optimality in human motor performance: ideal control of rapid aimed movements. *Psychological review*, 95 (3), 340–370. doi: 10.1037/0033-295x.95.3.340
- Mihelj, M., Novak, D. & Beguš, S. (2014). *Virtual Reality Technology and Applications* (Bd. 68). Dordrecht: Springer Netherlands. doi: 10.1007/978-94-007-6910-6
- Mihelj, M. & Podobnik, J. (2012). *Haptics for Virtual Reality and Teleoperation* (Bd. 64). Dordrecht: Springer Netherlands. doi: 10.1007/978-94-007-5718-9
- Mine, M. R. (1995a). ISAAC: A virtual environment tool for the interactive construction of virtual worlds. *UNC Chapel Hill Computer Science Technical Report TR95-020*.
- Mine, M. R. (1995b). Virtual Environment Interaction Techniques. *UNC Chapel Hill computer science technical report TR95-018*.
- Mine, M. R., Brooks Jr., F. P. & Sequin, C. H. (1997). Moving objects in space: exploiting proprioception in virtual-environment interaction. In G. S. Owen (Hrsg.), *Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques* (S. 19–26). ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co. doi: 10.1145/258734.258747
- Minge, M. & Riedel, L. (2013). meCUE - Ein modularer Fragebogen zur Erfassung des Nutzungserlebens. In S. Boll, S. Maaß & R. Malaka (Hrsg.), *Mensch & Computer 2013: Interaktive Vielfalt* (S. 89–98). München: Oldenbourg Verlag.
- Moore, A. G., Hatch, J. G., Kuehl, S. & McMahan, R. P. (2018). VOTE: A ray-casting study of vote-oriented technique enhancements. *International Journal of Human-Computer Studies*, 120, 36–48. doi: 10.1016/j.ijhcs.2018.07.003
- Muhanna, M. A. (2015). Virtual reality and the CAVE: Taxonomy, interaction challenges and research directions. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, 27 (3), 344–361. doi: 10.1016/j.jksuci.2014.03.023
- Müller-Tomfelde, C. (2007). Dwell-Based Pointing in Applications of Human Computer Interaction. In C. Baranauskas, P. Palanque, J. Abascal & S. D. J. Barbosa (Hrsg.), *Human-Computer Interaction – INTERACT 2007* (Bd. 4662, S. 560–573). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi: 10.1007/978-3-540-74796-3_56
- Nielsen, J. (1993). *Usability engineering*. Amsterdam: Morgan Kaufmann.
- Noller, F. (2016). *Suggesting Design Principles for Interaction Models in Virtual Reality* (Masterarbeit). Technische Universität Berlin, Berlin.
- Octavia, J. R., Raymaekers, C. & Coninx, K. (2011). Adaptation in virtual environments: conceptual framework and user models. *Multimedia Tools and Applications*, 54 (1),

- 121–142. doi: 10.1007/s11042-010-0525-z
- Oh, J.-Y. & Stuerzlinger, W. (2002). Laser pointers as collaborative pointing devices. *Graphics Interface*.
- Osawa, N. (2006). Automatic adjustments for efficient and precise positioning and release of virtual objects. In H. Sun (Hrsg.), *Proceedings of the 2006 ACM international conference on Virtual reality continuum and its applications* (S. 121). New York, NY: ACM. doi: 10.1145/1128923.1128943
- Ouramdane, N., Otmane, S., Davesne, F. & Malle, M. (2006). FOLLOW-ME: a new 3D interaction technique based on virtual guides and granularity of interaction. In H. Sun (Hrsg.), *Proceedings of the 2006 ACM international conference on Virtual reality continuum and its applications* (S. 137). New York, NY: ACM. doi: 10.1145/1128923.1128945
- Owen, R. N., Kurtenbach, G., Fitzmaurice, G. W., Baudel, T. & Buxton, W. (2005). When it gets more difficult, use both hands: exploring bimanual curve manipulation. In K. Inkpen (Hrsg.), *Graphics interface 2005*. Mississauga: Canadian Information Processing Society.
- Parsons, L. M. (1995). Inability to reason about an object’s orientation using an axis and angle of rotation. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 21 (6), 1259–1277. doi: 10.1037/0096-1523.21.6.1259
- Pavlovych, A. & Stuerzlinger, W. (2009). The tradeoff between spatial jitter and latency in pointing tasks. In T. C. N. Graham (Hrsg.), *Proceedings of the 1st ACM SIGCHI symposium on Engineering interactive computing systems* (S. 187). New York, NY: ACM. doi: 10.1145/1570433.1570469
- Periverzov, F. & Ilić, H. (2015). IDS: The intent driven selection method for natural user interfaces. In R. Lindeman (Hrsg.), *2015 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)* (S. 121–128). Piscataway, NJ: IEEE. doi: 10.1109/3DUI.2015.7131736
- Pfeuffer, K., Mayer, B., Mardanbegi, D. & Gellersen, H. (2017). Gaze + pinch interaction in virtual reality. In A. L. Simeone (Hrsg.), *Proceedings of the 5th Symposium on Spatial User Interaction* (S. 99–108). New York, NY: ACM. doi: 10.1145/3131277.3132180
- Pierce, J. S. & Pausch, R. (2002). Comparing voodoo dolls and HOMER. In D. Wixon (Hrsg.), *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (S. 105). New York, NY: ACM. doi: 10.1145/503376.503396
- Pierce, J. S., Stearns, B. C. & Pausch, R. (1999). Voodoo dolls: seamless interaction at multiple scales in virtual environments. In J. Rossignac (Hrsg.), *Proceedings of the 1999 symposium on Interactive 3D graphics* (S. 141–145). New York, NY: ACM. doi: 10.1145/300523.300540
- Poupyrev, I., Billingham, M., Weghorst, S. & Ichikawa, T. (1996). The go-go interaction technique: non-linear mapping for direct manipulation in VR. In D. Kurlander (Hrsg.), *Proceedings of the 9th annual ACM symposium on User interface software and technology* (S. 79–80). New York, NY: ACM. doi: 10.1145/237091.237102
- Poupyrev, I. & Ichikawa, T. (1999). Manipulating Objects in Virtual Worlds: Categorization and Empirical Evaluation of Interaction Techniques. *Journal of Visual Languages & Computing*, 10 (1), 19–35. doi: 10.1006/jvlc.1998.0112
- Poupyrev, I., Ichikawa, T., Weghorst, S. & Billingham, M. (1998). Egocentric Object Manipulation in Virtual Environments: Empirical Evaluation of Interaction Techniques. *Computer Graphics Forum*, 17 (3), 41–52. doi: 10.1111/1467-8659.00252
- Poupyrev, I. & Kruijff, E. (2000). *20th Century 3DUI Bib: Annotated Bibliography of 3D*

- User Interfaces of the 20th Century.*
- Poupyrev, I., Weghorst, S., Billinghamurst, M. & Tadao, I. (1997). A framework and testbed for studying manipulation techniques for immersive VR. In D. Thalmann (Hrsg.), *Proceedings of the ACM symposium on Virtual reality software and technology*. New York, NY: ACM. doi: 10.1145/261135.261141
- Poupyrev, I., Weghorst, S. & Fels, S. (2000). Non-isomorphic 3D rotational techniques. In T. Turner (Hrsg.), *Proceedings of the SIGCHI conference on Human Factors in Computing Systems* (S. 540–547). New York, NY: ACM. doi: 10.1145/332040.332497
- Proctor, R. W. & Vu, K.-P. L. (2006). Selection and Control of Action. In G. Salvendy (Hrsg.), *Handbook of Human Factors and Ergonomics* (S. 89–110). Hoboken: John Wiley & Sons. doi: 10.1002/0470048204.ch4
- Qian, Y. Y. & Teather, R. J. (2017). The eyes don't have it. In A. L. Simeone (Hrsg.), *Proceedings of the 5th Symposium on Spatial User Interaction* (S. 91–98). New York, NY: ACM. doi: 10.1145/3131277.3132182
- Ramcharitar, A. & Teather, R. (2018). EZCursorVR: 2D Selection with Virtual Reality Head-Mounted Displays. In C. Batty & D. Reilly (Hrsg.), *Proceedings of the 44th Graphics Interface Conference* (S. 123–130). Canadian Human-Computer Communications Society. doi: 10.20380/GI2018.17
- Ren, G. & O'Neill, E. (2013). 3D selection with freehand gesture. *Computers & Graphics*, 37 (3), 101–120. doi: 10.1016/j.cag.2012.12.006
- Richter, A. (2017). *Virtual reality based learning for assessing natural hazards* (Masterarbeit). Universität Potsdam, Potsdam.
- Richter, A. & Weise, M. (2018). Bewertung von Naturgefahren mit Hilfe von Virtual Reality. In D. Krömker & U. Schroeder (Hrsg.), *DeLFI 2018*. Bonn: Gesellschaft für Informatik.
- Riege, K., Holtkamper, T., Wesche, G. & Frohlich, B. (2006). The Bent Pick Ray: An Extended Pointing Technique for Multi-User Interaction. In *3DUI 2006* (S. 62–65). Piscataway, N.J.: IEEE. doi: 10.1109/VR.2006.127
- Samini, A. & Palmerius, K. L. (2017). Popular Performance Metrics for Evaluation of Interaction in Virtual and Augmented Reality. In *2017 International Conference on Cyberworlds* (S. 206–209). Piscataway, NJ: IEEE. doi: 10.1109/CW.2017.25
- Sanz, F. A. (2011). *Pointing facilitation techniques for 3d object selection on virtual environments* (Doctoral thesis). Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.
- Sauro, J. & Lewis, J. R. (2009). Correlations among prototypical usability metrics. In D. R. Olsen (Hrsg.), *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (S. 1609). New York, NY: ACM. doi: 10.1145/1518701.1518947
- Schäfer, T. (2010). *Statistik I: Deskriptive und Explorative Datenanalyse*. VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- Scheliga, K., Pampel, H., Konrad, U., Fritzsich, B., Schlauch, T., Nolden, M., ... Denker, M. (2019). *Dealing with research software: Recommendations for best practices*. Helmholtz Open Science Coordination Office. doi: 10.2312/OS.HELMHOLTZ.003
- Schultheis, U., Jerald, J., Toledo, F., Yoganandan, A. & Mlyniec, P. (2012). Comparison of a two-handed interface to a wand interface and a mouse interface for fundamental 3D tasks. In M. Billinghamurst (Hrsg.), *2012 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)* (S. 117–124). Piscataway, NJ: IEEE. doi: 10.1109/3DUI.2012.6184195
- Shneiderman, B. (2014). *Designing the user interface: Strategies for effective human-computer interaction* (5. Aufl.). Harlow: Pearson.

- Slater, M., Usoh, M. & Steed, A. (1994). Depth of Presence in Virtual Environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 3 (2), 130–144. doi: 10.1162/pres.1994.3.2.130
- Soares, L. P., Pinho, M. S. & Kopper, R. (2017). Design and preliminary evaluation of an EGO-exocentric technique for cooperative manipulation. In *2017 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)* (S. 203–204). Piscataway, NJ: IEEE. doi: 10.1109/3DUI.2017.7893342
- Song, P., Goh, W. B., Hutama, W., Fu, C.-W. & Liu, X. (2012). A handle bar metaphor for virtual object manipulation with mid-air interaction. In J. A. Konstan, E. H. Chi & K. Höök (Hrsg.), *CHI 2012, it's the experience* (S. 1297). New York, NY: ACM. doi: 10.1145/2207676.2208585
- Soukoreff, R. W. & MacKenzie, I. S. (2004). Towards a standard for pointing device evaluation, perspectives on 27 years of Fitts' law research in HCI. *International Journal of Human-Computer Studies*, 61 (6), 751–789. doi: 10.1016/j.ijhcs.2004.09.001
- Stanney, K. M., Mollaghasemi, M., Reeves, L., Breaux, R. & Graeber, D. A. (2003). Usability engineering of virtual environments (VEs): Identifying multiple criteria that drive effective VE system design. *International Journal of Human-Computer Studies*, 58 (4), 447–481. doi: 10.1016/S1071-5819(03)00015-6
- Steed, A. (2006). Towards a General Model for Selection in Virtual Environments. In *3DUI 2006* (S. 103–110). Piscataway, N.J.: IEEE. doi: 10.1109/VR.2006.134
- Steed, A. & Parker, C. (2004). 3D Selection Strategies for Head Tracked and Non-Head Tracked Operation of Spatially Immersive Displays. In L. Arns (Hrsg.), *8th International Immersive Projection Technology Workshop* (S. 13–14). New York, NY: ACM.
- Steland, A. (2007). *Basiswissen Statistik: Kompaktkurs für Anwender aus Wirtschaft, Informatik und Technik*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. doi: 10.1007/978-3-540-74206-7
- Steuer, J. (1992). Defining Virtual Reality: Dimensions Determining Telepresence. *Journal of Communication*, 42 (4), 73–93. doi: 10.1111/j.1460-2466.1992.tb00812.x
- Stoakley, R., Conway, M. J. & Pausch, R. (1995). Virtual reality on a WIM: interactive worlds in miniature. In I. R. Katz, R. Mack, L. Marks, M. B. Rosson & J. Nielsen (Hrsg.), *CHI '95*. New York, NY, USA: ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co. doi: 10.1145/223904.223938
- Stuart, K. (2020). When up means down: why do so many video game players invert their controls? *The Guardian*. Zugriff am 26.12.2020 auf <https://www.theguardian.com/games/2020/feb/28/why-do-video-game-players-invert-the-controls>
- Sutcliffe, A. & Gault, B. (2004). Heuristic evaluation of virtual reality applications. *Interacting with Computers*, 16 (4), 831–849. doi: 10.1016/j.intcom.2004.05.001
- Sutherland, I. E. (1965). The ultimate display. *Multimedia: From Wagner to virtual reality*.
- Tanriverdi, V. & Jacob, R. J. (2001). VRID: A Design Model and Methodology for Developing Virtual Reality Interfaces. In *Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology* (S. 175–182). New York, NY, USA: Association for Computing Machinery. doi: 10.1145/505008.505042
- Taylor, F. V. (1957). Psychology and the design of machines. *American Psychologist*, 12 (5), 249–258. doi: 10.1037/h0042194
- Teather, R. J. & Stuerzlinger, W. (2007). Guidelines for 3D positioning techniques.

- In B. Kapralos, M. Katchabaw & J. Rajnovich (Hrsg.), *Proceedings of the 2007 conference on Future Play* (S. 61). New York, NY: ACM. doi: 10.1145/1328202.1328214
- Ulinski, A. C., Wartell, Z., Goolkasian, P., Suma, E. A. & Hodges, L. F. (2009). Selection performance based on classes of bimanual actions. In K. Kiyokawa (Hrsg.), *IEEE Symposium on 3D User Interfaces, 2009* (S. 51–58). Piscataway, NJ: IEEE. doi: 10.1109/3DUI.2009.4811205
- Ulinski, A. C., Zambaka, C., Wartell, Z., Goolkasian, P. & Hodges, L. F. (2007). Two Handed Selection Techniques for Volumetric Data. In W. Stürzlinger, Y. Kitamura & S. Coquillart (Hrsg.), *IEEE Symposium on 3D User Interfaces*. Piscataway, NJ: Institute of Electrical and Electronics Engineers. doi: 10.1109/3DUI.2007.340782
- Vaillancourt, D. E. & Newell, K. M. (2000). Amplitude changes in the 8–12, 20–25, and 40 Hz oscillations in finger tremor. *Clinical Neurophysiology*, 111 (10), 1792–1801. doi: 10.1016/S1388-2457(00)00378-3
- van Dam, A. (1997). Post-WIMP user interfaces. *Communications of the ACM*, 40 (2), 63–67. doi: 10.1145/253671.253708
- Vanacken, L., Grossman, T. & Coninx, K. (2007). Exploring the Effects of Environment Density and Target Visibility on Object Selection in 3D Virtual Environments. In W. Stürzlinger, Y. Kitamura & S. Coquillart (Hrsg.), *IEEE Symposium on 3D User Interfaces*. Piscataway, NJ: Institute of Electrical and Electronics Engineers. doi: 10.1109/3DUI.2007.340783
- Vanacken, L., Grossman, T. & Coninx, K. (2009). Multimodal selection techniques for dense and occluded 3D virtual environments. *International Journal of Human-Computer Studies*, 67 (3), 237–255. doi: 10.1016/j.ijhcs.2008.09.001
- Vanacken, L., Raymaekers, C. & Coninx, K. (2006). Evaluating the Influence of Multimodal Feedback on Egocentric Selection Metaphors in Virtual Environments. In D. Hutchison et al. (Hrsg.), *Haptic and audio interaction design* (Bd. 4129, S. 12–23). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi: 10.1007/11821731_2
- Veit, M., Capobianco, A. & Bechmann, D. (2009). Influence of degrees of freedom’s manipulation on performances during orientation tasks in virtual reality environments. In Y. Kitamura (Hrsg.), *Proceedings of the 16th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology* (S. 51). New York, NY: ACM. doi: 10.1145/1643928.1643942
- Vejvoda, M., Samel, A., Maaß, H., Luks, N., Linke-Hommel, A., Schulze, M., ... Hinninghofen, H. (2000). Untersuchungen zur Beanspruchung des Kabinenpersonals auf transmeridianen Strecken. *Forschungsbericht Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt* (32).
- Vines, T. H., Albert, A. Y. K., Andrew, R. L., Débarre, F., Bock, D. G., Franklin, M. T., ... Rennison, D. J. (2014). *Data from: The availability of research data declines rapidly with article age*. Dryad. doi: 10.5061/DRYAD.Q3G37
- Ware, C. & Rose, J. (1999). Rotating virtual objects with real handles. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, 6 (2), 162–180. doi: 10.1145/319091.319102
- Weise, M., Schulz, I., Tallig, G., Zender, R. & Lucke, U. (2020). Virtual Reality in der Fahrzeuglackierausbildung. In L. Onnasch & M. Rötting (Hrsg.), *Tagungsband des 66. Frühjahrskongresses der Gesellschaft für Arbeitswissenschaften*. Dortmund: GfA-Press.
- Weise, M. & Zender, R. (2017). Interaktionstechniken in VR-Lernwelten. In C. Ullrich & M. Wessner (Hrsg.), *Joint Proceedings of the Pre-Conference Workshops of DeLFI*

- and *GMW 2017*.
- Weise, M. & Zender, R. (2018). Auswahl von Interaktionstechniken für Virtual Reality-Anwendungen. In R. Dachsel & G. Weber (Hrsg.), *Mensch und Computer 2018 - Workshops*. Bonn: Gesellschaft für Informatik e.V. doi: 10.18420/MUC2018-MCI-0362
- Weise, M. & Zender, R. (2019). A Systematic Literature Review on Independent Variables Used in User Studies on 3D Selection and Manipulation Techniques. In P. Grimm, Y. Jung & R. Dörner (Hrsg.), *16. Workshop der GI-Fachgruppe VR/AR*.
- Weise, M., Zender, R. & Lucke, U. (2015). Systematic Fusion of Gesture Sensors for Practical Learning in Virtual Environments. In *2015 IEEE 15th International Conference on Advanced Learning Technologies (ICALT)* (S. 83–87). IEEE / Institute of Electrical and Electronics Engineers Incorporated. doi: 10.1109/ICALT.2015.47
- Weise, M., Zender, R. & Lucke, U. (2019). A Comprehensive Classification of 3D Selection and Manipulation Techniques. In F. Alt, A. Bulling & T. Döring (Hrsg.), *Mensch und Computer 2019 - Tagungsband* (S. 321–332). New York, NY, USA: ACM / Association for Computing Machinery. doi: 10.1145/3340764.3340777
- Weise, M., Zender, R. & Lucke, U. (2020). „How can I grab that?“. Solving issues of interaction in VR by choosing suitable selection and manipulation techniques. In F. Steinicke & K. Wolf (Hrsg.), *i-com – Journal of Interactive Media*. De Gruyter. doi: 10.1515/icom-2020-0011
- Wienrich, C., Noller, F. & Thüring, M. (2017). Design Principles for VR Interaction Models: An Empirical Pilot Study. In R. Dörner, R. Kruse, B. Mohler & R. Weller (Hrsg.), *Virtuelle und Erweiterte Realität* (S. 161–172). Herzogenrath: Shaker.
- Wilkes, C. & Bowman, D. A. (2008). Advantages of velocity-based scaling for distant 3D manipulation. In S. Feiner (Hrsg.), *Proceedings of the 2008 ACM symposium on Virtual reality software and technology* (S. 23). New York, NY: ACM. doi: 10.1145/1450579.1450585
- Wilkinson, M. D., Dumontier, M., Aalbersberg, I. J. J., Appleton, G., Axton, M., Baak, A., ... Mons, B. (2016). The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship. *Scientific data*, 3, 160018. doi: 10.1038/sdata.2016.18
- Wingrave, C. A. (2009). 3DUI flavors beyond vanilla. In M. E. Latoschik (Hrsg.), *SEARIS 2009 2th Workshop on IEEE VR*.
- Wingrave, C. A. & Bowman, D. A. (2005). Baseline Factors for Raycasting Selection. In *Proceedings of Virtual Reality International 2015*.
- Wingrave, C. A., Bowman, D. A. & Ramakrishnan, N. (2002). Towards preferences in virtual environment interfaces. In W. Stürzlinger & S. Müller (Hrsg.), *Proceedings of the Workshop on Virtual Environments 2002*. New York: Association for Computing Machinery.
- Wingrave, C. A., Haciahmetoglu, Y. & Bowman, D. A. (2006). Overcoming World in Miniature Limitations by a Scaled and Scrolling WIM. In *3DUI 2006* (S. 11–16). Piscataway, N.J.: IEEE. doi: 10.1109/VR.2006.106
- Wingrave, C. A., Tintner, R., Walker, B. N., Bowman, D. A. & Hodges, L. F. (2005). Exploring Individual Differences in Raybased Selection; Strategies and Traits. In B. Fröhlich, H. Takemura & S. Julier (Hrsg.), *IEEE Virtual Reality 2005*. Piscataway, N.J.: IEEE. doi: 10.1109/VR.2005.35
- Wonner, J., Grosjean, J., Capobianco, A. & Bechmann, D. (2012). Starfish: a selection technique for dense virtual environments. In M. Green, W. Stuerzlinger, M. E. Latoschik & B. Kapralos (Hrsg.), *Proceedings of the 18th ACM symposium*

- on *Virtual reality software and technology* (S. 101). New York, NY: ACM. doi: 10.1145/2407336.2407356
- Wullaert, G. (2019). *Empfehlung von VR-Interaktionstechniken mit Hilfe eines webbasierten Recommenders* (Bachelorarbeit). Universität Potsdam, Potsdam.
- Zender, R., Sander, P., Weise, M., Mulders, M., Lucke, U. & Kerres, M. (2020). HandLeVR: Action-Oriented Learning in a VR Painting Simulator. In Birukou & Popescu (Hrsg.), *Emerging Technologies for Education* (Bd. 11984, S. 46–51). Cham: Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-030-38778-5_6
- Zender, R., Weise, M. & Lucke, U. (2019). HandLeVR - Handlungsorientiertes Lernen in der VR-Lackierwerkstatt. In N. Pinkwart & J. Konert (Hrsg.), *DeLFI 2019*. Bonn: Gesellschaft für Informatik e.V. (GI). doi: 10.18420/DELFI2019_314
- Zender, R., Weise, M., von der Heyde, M. & Söbke, H. (2018a). Chancen und Herausforderungen beim Lernen und Lehren mit VR/AR-Technologien. In D. Krömker & U. Schroeder (Hrsg.), *DeLFI 2018*. Bonn: Gesellschaft für Informatik.
- Zender, R., Weise, M., von der Heyde, M. & Söbke, H. (2018b). Lehren und Lernen mit VR und AR-Was wird erwartet? Was funktioniert? In D. Schiffner (Hrsg.), *DeLFI Workshops 2018*.
- Zhai, S., Kong, J. & Ren, X. (2004). Speed–accuracy tradeoff in Fitts’ law tasks—on the equivalency of actual and nominal pointing precision. *International Journal of Human-Computer Studies*, 61 (6), 823–856. doi: 10.1016/j.ijhcs.2004.09.007
- Zhai, S. & Milgram, P. (1998). Quantifying coordination in multiple DOF movement and its application to evaluating 6 DOF input devices. In M. E. Atwood (Hrsg.), *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (S. 320–327). New York, NY: ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co. doi: 10.1145/274644.274689
- Zielasko, D., Skorzynski, U., Kuhlen, T. W. & Weyers, B. (2018). Seamless Hand-Based Remote and Close Range Interaction in Immersive Virtual Environments. In R. Dachsel & G. Weber (Hrsg.), *Mensch und Computer 2018 - Workshops*. Bonn: Gesellschaft für Informatik e.V. doi: 10.18420/MUC2018-WS07-0332
- Zielinski, D. J., Nankivil, D. & Kopper, R. (2017). Specimen Box: A tangible interaction technique for world-fixed virtual reality displays. In *2017 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)* (S. 50–58). Piscataway, NJ: IEEE. doi: 10.1109/3DUI.2017.7893317

Abbildungsverzeichnis

1.1	Oft verwendete Selektions- und Manipulationstechniken	2
1.2	Weitere Selektions- und Manipulationstechniken	3
1.3	Zentrale Komponenten der Arbeit	5
1.4	Mögliche Freiheitsgrade, die ein Eingabegerät unterstützen kann	8
1.5	CAVE und VIVE Pro	10
1.6	Beispiel für ein Widget in Form eines Koordinatensystems	11
2.1	Modell zur Interaktion in VR-Umgebungen	15
2.2	Optimized Initial Impulse Model	17
2.3	Solid angle mismatch	23
2.4	Verschwendete Arbeit anhand der Positionierung eines Objekts in 2D	27
2.5	Aufbau des Context-Driven Interaction Toolkit	33
2.6	Aufbau des Frameworks für adaptive personalisierte Interaktionstechniken	34
2.7	Bewertung einer Anwendung mit MAUVE auf Basis von Heuristiken	35
3.1	Beispiel einer Taxonomie mit drei Dimensionen	39
3.2	Vorgehen bei der Erstellung der Taxonomie	40
3.3	Dimensionen und Unterdimensionen der Taxonomie	41
3.4	Mögliche Merkmale der Dimension Metapher	46
3.5	Beispiele für Techniken, die auf Metaphern aus der Realität basieren	47
3.6	Mögliche Merkmale der Dimension Anforderungen an Eingabegeräte	49
3.7	Schematische Darstellung der Techniken 6-DOF Hand und Handle-Bar	50
3.8	Asymmetric Bimanual Gestural Interface	53
3.9	Mögliche Merkmale der Dimension Abbildungsfunktion	54
3.10	Abbildungsfunktion von Scaled HOMER	55
3.11	Manipulation eines Objekts mit der Crank Handle Technik	56
3.12	Veränderbare Cursor bei Bubble Cursor und Starfish	59
3.13	Mögliche Merkmale der Dimension Disambiguierung	60
3.14	Beispiele für kontinuierliche und diskrete Reduzierung	61
4.1	Vereinfachte Taxonomie mit in der Studie nicht abgedeckten Dimensionen	72
4.2	Buttons des Controllers	73
4.3	Simple Virtual Hand	74
4.4	Scaled Scrolling Worlds in Miniature + Scale	75
4.5	Bimanual Fishing Reel + Scale	76
4.6	Flashlight und IntenSelect	77
4.7	Expand	78
4.8	Crank Handle	79
4.9	Spindle	80
4.10	Go-Go + PRISM	81
4.11	Head-based Selection	82

4.12	Scaled HOMER (+ Scale)	83
4.13	Virtuelle Testumgebung	84
4.14	Aufgaben	85
4.15	Ergebnisse des persönlichen Fragebogens aus der Selektionsstudie	90
4.16	Ergebnisse des persönlichen Fragebogens aus der Manipulationsstudie	91
4.17	Gemessene Zeiten in der Selektionsstudie	93
4.18	Timeouts in der Selektionsstudie	94
4.19	Fehlerhafte Selektionen in der Selektionsstudie	95
4.20	Ergebnisse des System Usability Scales aus der Selektionsstudie	100
4.21	Ergebnisse des NASA Task Load Index aus der Selektionsstudie	101
4.22	Selektion: Fragen	102
4.23	Aggregierte Sortierung der Techniken aus der Selektionsstudie	105
4.24	Zeiten der Manipulationsstudie	107
4.25	Timeouts der Manipulationsstudie	108
4.26	Präzision der Position der Manipulationsstudie	109
4.27	Präzision der Rotation der Manipulationsstudie	110
4.28	Präzision der Skalierung der Manipulationsstudie	111
4.29	Ergebnisse des System Usability Scales aus der Manipulationsstudie	118
4.30	Ergebnisse des NASA Task Load Index aus der Manipulationsstudie	118
4.31	Manipulation: Fragen	119
4.32	Aggregierte Sortierung der Techniken aus der Manipulationsstudie	122
4.33	Subjektive Natürlichkeit im Vergleich zur Interaction Fidelity	131
5.1	Hauptansicht von S3DIT	149
5.2	Detailansicht einer Technik.	150
5.3	Zweistufiger Dialog für die Sortierung der Techniken	151
5.4	Einstellungsmöglichkeiten bei der Aufgabengenerierung	153
6.1	Herleiten der Performance einer Technik aus den Resultaten mehrerer Studien	160
6.2	FAIR Prinzipien	161

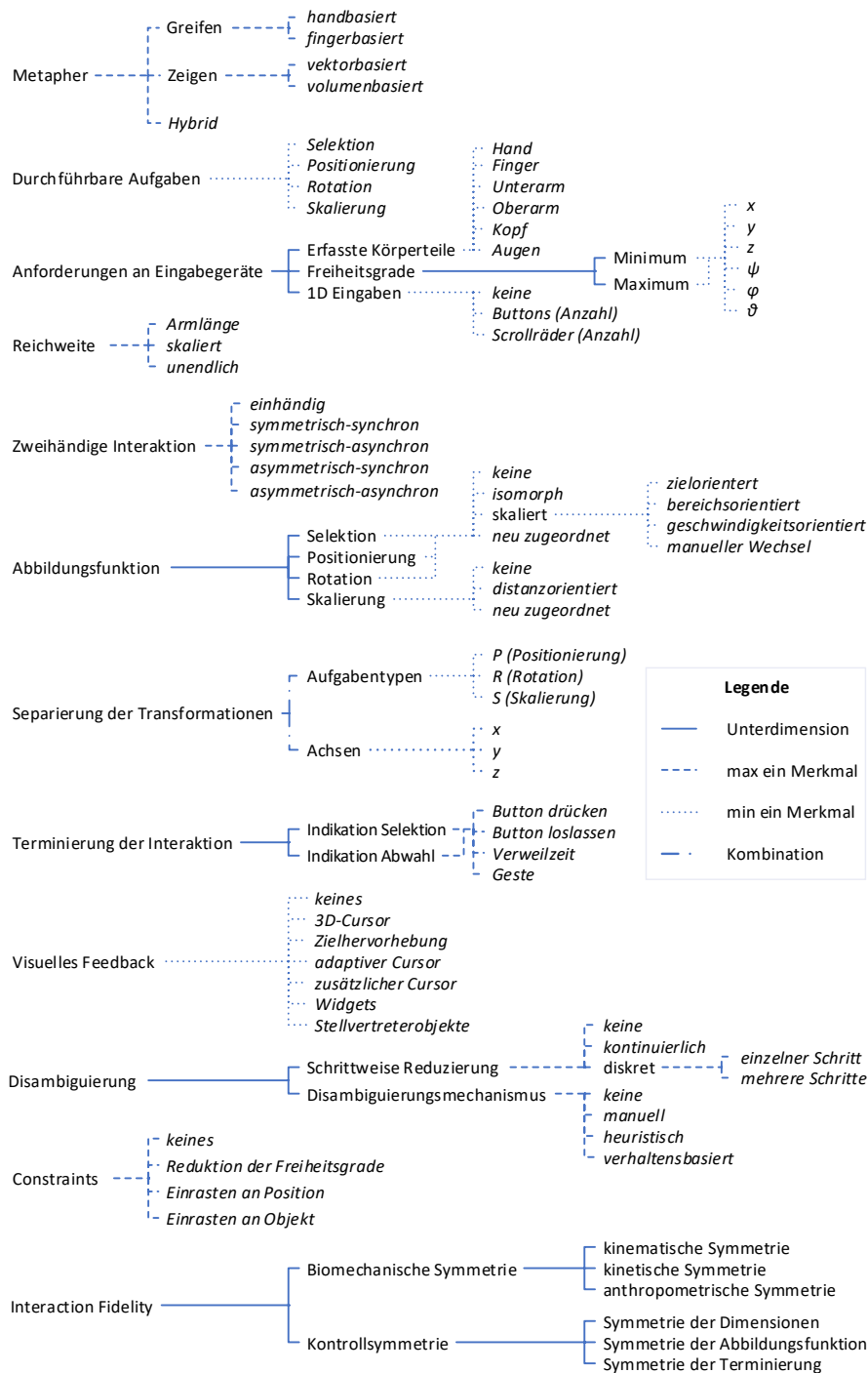
Tabellenverzeichnis

3.1	Anwendung der Taxonomie auf ausgewählte Interaktionstechniken	42
3.2	Eigenschaften von ausgewählten Eingabegeräten.	51
4.1	Auswirkungen des Manipulationsgrads auf die Aufgaben	86
4.2	Korrelationen aus der Selektionsstudie	96
4.3	Korrelationen aus der Manipulationsstudie	112
5.1	Anforderungen an S3DIT	148

Anhang

A.1 Vollständige Taxonomie

In der folgenden Abbildung ist die Taxonomie mit allen Dimensionen und Merkmalen zu sehen. Die Dimensionen sind in normaler und die Merkmale in kursiver Schrift. Bei Linien, die zusammenführen, haben die Dimensionen die gleichen möglichen Merkmale. Die Merkmale für die Interaction Fidelity hängen von der Vergleichsmetapher ab, und werden aus diesem Grund hier nicht aufgeführt. Die Aufgabentypen und Achsen bei der Separierung der Transformationen werden kombiniert (siehe Kapitel 3.2.7).



A.2 Ausgewählte Interaktionstechniken

Anhand folgender Tabelle lässt sich ablesen, welche der in der vorgestellten Studie verwendeten Techniken, welche Merkmale der Taxonomie besitzen. Dies wird durch ein x in der entsprechenden Zelle gekennzeichnet. Merkmale, die keine der Techniken besitzen, sind kursiv geschrieben. Die Gründe hierfür werden in Kapitel 4.2 erläutert.

	Simple Virtual Hand	Scaled Scrolling World In Miniature + Scale	Bimanual Fishing Reel + Scale	Expand	Crank Handle	Spindle	Go-Go + PRISM	Head Based Selection	Inten-Select	Scaled HOMER + Scale	Scaled HOMER	Flash-light
<i>Metapher</i>												
handbasiert	x	x			x	x	x					
<i>fingerbasiert</i>												
vektorbasiert			x					x				
volumenbasiert				x					x			x
Hybrid										x	x	
<i>Durchführbare Aufgaben</i>												
Selektion	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x
Positionierung	x	x	x		x	x	x			x	x	
Rotation	x	x	x		x	x	x			x	x	
Skalierung		x	x			x				x		
<i>Erfasste Körperteile</i>												
Hand	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x
Finger												
<i>Unterarm</i>												
<i>Oberarm</i>												
Kopf								x				
<i>Augen</i>												
<i>Freiheitsgrade Minimum</i>												
nur Position						x						
nur Rotation			x	x				x	x			x
Position und Rotation	x	x			x	x	x			x	x	
<i>Freiheitsgrade Maximum</i>												
nur Position						x						
<i>nur Rotation</i>												
Position und Rotation	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
<i>1D Eingaben</i>												
keine								x				
Buttons	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x
Scrollräder		x										
<i>Reichweite</i>												
Armlänge	x				x	x						
skaliert							x					
unendlich		x	x	x				x	x	x	x	x
<i>Zweihändige Interaktion</i>												
einhändig	x			x	x		x		x		x	x
symmetrisch						x						
asymmetrisch		x	x							x		
synchron	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
<i>asynchron</i>												
<i>Abbildungsfunktion Selektion</i>												
keine					x							
isomorph	x		x	x		x		x	x	x	x	x
skaliert							x					
neu zugeordnet		x										
<i>Abbildungsfunktion Positionierung</i>												
keine				x				x	x			x
isomorph	x				x	x						
skaliert							x			x	x	
neu zugeordnet		x	x									

	Simple Virtual Hand	Scaled Scrolling World In Miniature + Scale	Bimanual Fishing Reel + Scale	Expand	Crank Handle	Spindle	Go-Go + PRISM	Head Based Selection	Inten-Select	Scaled HOMER + Scale	Scaled HOMER	Flash-light
Abbildungsfunktion Rotation												
keine				x				x	x			x
isomorph	x					x	x				x	
skaliert										x		
neu zugeordnet		x	x		x	x						
Abbildungsfunktion Skalierung												
keine	x			x	x		x	x	x		x	x
distanz-orientiert						x				x		
neu zugeordnet		x	x									
Separierung der Transformationen												
keine	x					x	x				x	
partiell		x	x							x		
komplett					x							
Indikation Selektion												
Button drücken	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x
<i>Button loslassen</i>												
Verweilzeit								x				
<i>Geste</i>												
Indikation Abwahl												
Button drücken			x									
Button loslassen	x	x			x	x	x			x	x	
<i>Verweilzeit</i>												
<i>Geste</i>												
Visuelles Feedback												
3D-Cursor	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Zielhervorhebung			x									
adaptiver Cursor									x			
zusätzlicher Cursor									x			
Widgets				x	x							
Stellvertreterobjekte		x										
Schrittweise Reduzierung												
keine	x	x	x		x	x	x	x		x	x	
kontinuierlich									x			
diskret/ einzelner Schritt												x
diskret/ mehrere Schritte				x								
Disambiguierungsmechanismus												
keine	x	x	x		x	x	x	x		x	x	
manuell				x								
heuristisch												x
verhaltensbasiert									x			
Constraints												
keines	x	x	x	x		x	x	x		x	x	
Reduktion der Freiheitsgrade					x							
Einrasten an Position/ Objekt									x			x
Interaction Fidelity												
hoch	x											
moderat hoch		x		x	x	x	x	x	x	x	x	x
moderat			x									
<i>moderat gering</i>												
<i>gering</i>												

A.3 Dokumente Selektionsstudie

Sie bekommen gleich eine VR-Brille aufgesetzt und befinden sich dann in einem virtuellen Raum. Dort ist es Ihre Aufgabe Objekte zu selektieren. Anfangs erscheint eine rote Kugel vor Ihnen (siehe Abbildung 1). Sobald Sie diese auswählen beginnt die Zeitmessung. Dann erscheint eine Kugel oder auch mehrere Kugeln, wobei die zu selektierende Kugel grün hervorgehoben ist (siehe Abbildung 2). Die Zeit stoppt sobald sie die richtige Kugel ausgewählt haben. Die Aufgaben sollten so schnell und so präzise wie möglich durchgeführt werden, schließlich gibt es etwas zu gewinnen. Sie haben maximal 30 Sekunden Zeit pro Aufgabe. Die Aufgaben werden mit fünf verschiedenen Interaktionstechniken durchgeführt. Die Funktionsweise der Interaktionstechniken wird Ihnen Anfangs immer erklärt. Die benötigten Buttons der Controller sind in Abbildung 3 zu sehen. Anschließend haben Sie maximal 5 Minuten Zeit, um den Umgang mit der Technik zu üben. Dann beginnen die Aufgaben. Bleiben sie bei der Durchführung der Aufgaben möglichst auf einer Stelle stehen. Nachdem alle Aufgaben mit einer Interaktionstechnik durchgeführt wurden, wird Ihnen die VR-Brille abgenommen und sie füllen zwei Fragebögen aus. Nachdem alle fünf Interaktionstechniken verwendet wurden, füllen Sie zusätzlich einen abschließenden Fragebogen aus.

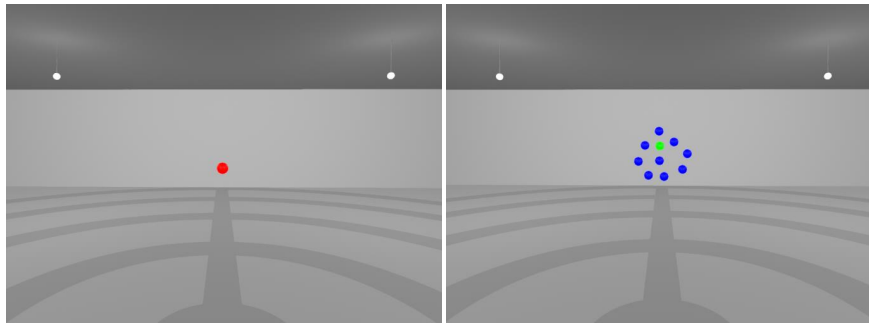


Abbildung 1: Rote Kugel deren Selektion die Zeitmessung startet

Abbildung 2: Anordnung blauer Kugeln mit zu selektierender grüner Kugel



Abbildung 3: Controller mit den benötigten Buttons

Information zur wissenschaftlichen Studie zum Vergleich von VR-Interaktionstechniken

Worum geht es?

Mit unserem Forschungsvorhaben wollen wir Entwickler/innen von Virtual Reality (VR)-Anwendungen dabei unterstützen die passenden Interaktionstechniken für ein spezifisches Anwendungsszenario auszuwählen. VR bezeichnet die Darstellung und gleichzeitige Wahrnehmung einer computergenerierten Welt, die durch verschiedene Technologien für die Nutzenden so erlebbar gemacht wird, als sei es die echte Welt. Dabei kommen bevorzugt VR-Brillen zum Einsatz, die die generierten Bilder auf die Kopfbewegungen anpassen und so das Umschauen in der virtuellen Umgebung ermöglichen. Für die Interaktion mit virtuellen Objekten werden Eingabegeräte verwendet, die die Bewegungen der Nutzenden im realen dreidimensionalen Raum erfassen. Interaktionstechniken wandeln diese Eingaben in bestimmte Aktionen im virtuellen dreidimensionalen Raum um. In dieser Studie sollen verschiedene Interaktionstechniken hinsichtlich ihrer Präzision und Geschwindigkeit bei der Lösung unterschiedlicher Aufgaben untersucht werden.

Wie läuft die Studie ab?

Eingangs der Studie werden Sie einen persönlichen Fragebogen ausfüllen. Anschließend werden Sie mit Hilfe von 5 verschiedenen Interaktionstechniken Objekte in einer virtuellen Umgebung selektieren. Dafür wird Ihnen eine VR-Brille aufgesetzt. Die Bewegungen Ihrer Hände werden mit 3D-Controllern erfasst. Nach jeder Interaktionstechnik füllen Sie zwei Fragebögen aus, mit deren Hilfe Sie die Techniken bewerten. Nachdem alle drei Interaktionstechniken durchlaufen wurden, folgt ein kurzer abschließender Fragebogen.

Welche Daten werden erfasst?

Über den persönlichen Fragebogen werden Alter, Geschlecht, Beruf, Händigkeit und die Nutzung einer Brille erfasst. Außerdem werden Erfahrungen mit bestimmten Technologien und Anwendungen erfragt. Bei der Durchführung der Aufgaben wird ermittelt wie schnell und wie präzise die Aufgaben durchgeführt wurden. Außerdem wird ermittelt welche Distanzen die Hände bei der Durchführung der Aufgaben überbrückt haben. Die Fragebögen nach jedem Durchlauf erfassen Ihre persönlichen Einschätzungen bezüglich der genutzten Interaktionstechniken hinsichtlich verschiedener Faktoren.

Gewinnspiel

Pro Interaktionstechnik wird eine Rangliste erstellt. Die Punkte ergeben sich aus der Geschwindigkeit und der Präzision mit der die Aufgaben durchgeführt wurden. Der/die Teilnehmer/in mit den meisten Punkten bei einer Technik gewinnt einen Amazon-Gutschein im Wert von 10 €. Jede/r Teilnehmer/in kann somit maximal fünf Gutscheine gewinnen. Sie können selber entscheiden, ob Sie an diesem Gewinnspiel teilnehmen möchten. Alle Teilnehmer/innen, die einen Gutschein gewonnen haben, werden am 1. April per E-Mail informiert und erhalten den entsprechenden Gutschein-Code.

Wie werden die Daten gespeichert?

Bis zum 1. April werden die Daten aller Teilnehmer/innen, die am Gewinnspiel teilnehmen pseudonymisiert gespeichert. Dies bedeutet, dass ein Kennzeichen verwendet wird, welches die zu Ihnen erfassten Daten auf die von Ihnen angegebene E-Mail-Adresse zurückführt. Die Liste mit den Kennzeichen und die E-Mail-Adressen werden am 1. April gelöscht. Ab diesem Zeitpunkt sind die Daten anonymisiert und können somit nicht mehr auf Ihre Person zurückgeführt werden. Sollten sie nicht am Gewinnspiel teilnehmen, werden Ihre Daten sofort anonymisiert gespeichert. Die Daten werden auf einem Rechner abgelegt, der nur für den Studienleiter zugänglich ist.

Widerrufsrecht

Die Teilnahme an der Studie ist vollkommen freiwillig und kann jederzeit ohne Angaben von Gründen abgebrochen werden. Die Teilnahme am Gewinnspiel können Sie jederzeit zurücknehmen. Ihr Kennzeichen und Ihre E-Mail-Adresse werden dann umgehend gelöscht und Ihre Daten liegen nur noch anonymisiert vor.

Ausschlusskriterien

In dieser Studie wird mit einer VR-Brille gearbeitet, die die Fähigkeit des dreidimensionalen Sehens voraussetzt. Personen die hiermit Probleme haben, sind von der Studie ausgeschlossen. Ebenso sind Personen ausgeschlossen, die eine Rot-Grün-Schwäche oder ähnliche Farbschwächen aufweisen.

Ansprechpartner

Bei weiteren Fragen können Sie jeder Zeit Matthias Weise (matthias.weise@uni-potsdam.de) kontaktieren.

Einverständniserklärung

Ich _____
(Name, Vorname)

erkläre hiermit, dass ich die Informationen zu der Studie „Vergleich von VR-Interaktionstechniken“ gelesen habe.

Es wurden etwaige Fragen zu meiner Zufriedenheit beantwortet.

Eine Kopie der Informationsschrift und dieser Einwilligungserklärung habe ich erhalten.

Ich erkläre hiermit meine Zustimmung darüber, dass Informationen, die im Rahmen dieser Studie über mich gesammelt werden im Rahmen dieser Studie ausgewertet werden dürfen.

Ich weiß, dass ich diese Einverständniserklärung jederzeit, ohne Angaben von Gründen, widerrufen kann, ohne dass das nachteilige Folgen für mich hat.

Ich möchte am Gewinnspiel teilnehmen. Mir ist bewusst, dass meine Daten dann bis zum 1. April pseudonymisiert und anschließend anonymisiert gespeichert werden.

E-Mail-Adresse: _____

Mit der Vorgehensweise der Untersuchung bin ich einverstanden und ich bestätige dies mit meiner Unterschrift:

(Ort, Datum)

(Unterschrift)

A.4 Dokumente Manipulationsstudie

Sie bekommen gleich eine VR-Brille aufgesetzt und befinden sich dann in einem virtuellen Raum. Dort ist es Ihre Aufgabe einen Würfel so zu manipulieren (d.h. die Position, die Ausrichtung und/oder die Größe des Objekts zu verändern), dass er sich möglichst genau mit einem transparenten Würfel überschneidet (siehe Abbildung 1). Die Zeitmessung beginnt sobald Sie den Würfel aufgenommen haben. Um die Distanzen besser abschätzen zu können, befinden sich unter den beiden Würfeln Markierungen. Zum Bestätigen der Lösung und stoppen der Zeit drücken sie einmal den Grip Button (siehe Abbildung 2). Kommt keine Erfolgsmeldung, ist der Würfel noch nicht genau genug platziert. Die Aufgaben sollten so schnell und so präzise wie möglich durchgeführt werden, schließlich gibt es etwas zu gewinnen. Sie haben maximal 30 Sekunden Zeit pro Aufgabe. Die Aufgaben werden mit drei verschiedenen Interaktionstechniken durchgeführt. Die Funktionsweise der Interaktionstechniken wird Ihnen Anfangs immer erklärt. Alle benötigten Buttons sind in Abbildung 2 zu sehen. Anschließend haben Sie maximal 5 Minuten Zeit, um den Umgang mit der Technik zu üben. Dann beginnen die Aufgaben. Bleiben sie bei der Durchführung der Aufgaben möglichst auf einer Stelle stehen. Nachdem alle Aufgaben mit einer Interaktionstechnik durchgeführt wurden, wird Ihnen die VR-Brille abgenommen und sie füllen zwei Fragebögen aus. Nachdem alle drei Interaktionstechniken verwendet wurden, füllen Sie zusätzlich einen abschließenden Fragebogen aus.

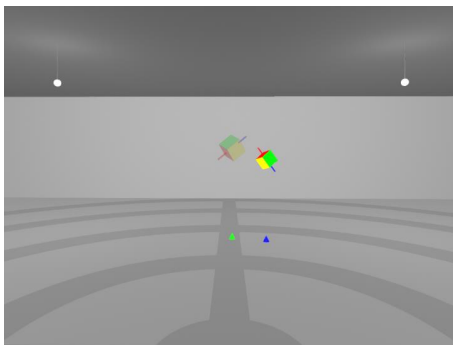


Abbildung 1: Zu manipulierender Würfel und transparenter Zielwürfel

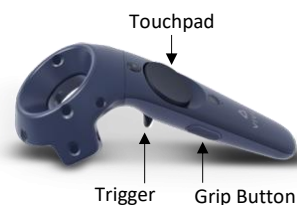


Abbildung 2: Controller mit den benötigten Buttons

Information zur wissenschaftlichen Studie zum Vergleich von VR-Interaktionstechniken

Worum geht es?

Mit unserem Forschungsvorhaben wollen wir Entwickler/innen von Virtual Reality (VR)-Anwendungen dabei unterstützen die passenden Interaktionstechniken für ein spezifisches Anwendungsszenario auszuwählen. VR bezeichnet die Darstellung und gleichzeitige Wahrnehmung einer computergenerierten Welt, die durch verschiedene Technologien für die Nutzenden so erlebbar gemacht wird, als sei es die echte Welt. Dabei kommen bevorzugt VR-Brillen zum Einsatz, die die generierten Bilder auf die Kopfbewegungen anpassen und so das Umschauen in der virtuellen Umgebung ermöglichen. Für die Interaktion mit virtuellen Objekten werden Eingabegeräte verwendet, die die Bewegungen der Nutzenden im realen dreidimensionalen Raum erfassen. Interaktionstechniken wandeln diese Eingaben in bestimmte Aktionen im virtuellen dreidimensionalen Raum um. In dieser Studie sollen verschiedene Interaktionstechniken hinsichtlich ihrer Präzision und Geschwindigkeit bei der Lösung unterschiedlicher Aufgaben untersucht werden.

Wie läuft die Studie ab?

Eingangs der Studie werden Sie einen persönlichen Fragebogen ausfüllen. Anschließend werden Sie mit Hilfe von drei verschiedenen Interaktionstechniken Objekte in einer virtuellen Umgebung positionieren, rotieren und/oder skalieren. Dafür wird Ihnen eine VR-Brille aufgesetzt. Die Bewegungen Ihrer Hände werden mit 3D-Controllern erfasst. Nach jeder Interaktionstechnik füllen Sie zwei Fragebögen aus, mit deren Hilfe Sie die Techniken bewerten. Nachdem alle drei Interaktionstechniken durchlaufen wurden, folgt ein kurzer abschließender Fragebogen.

Welche Daten werden erfasst?

Über den persönlichen Fragebogen werden Alter, Geschlecht, Beruf, Händigkeit und die Nutzung einer Brille erfasst. Außerdem werden Erfahrungen mit bestimmten Technologien und Anwendungen erfragt. Bei der Durchführung der Aufgaben wird ermittelt wie schnell und wie präzise die Aufgaben durchgeführt wurden. Außerdem wird ermittelt welche Distanzen die Hände bei der Durchführung der Aufgaben überbrückt haben. Die Fragebögen nach jedem Durchlauf erfassen Ihre persönlichen Einschätzungen bezüglich der genutzten Interaktionstechniken hinsichtlich verschiedener Faktoren.

Gewinnspiel

Pro Interaktionstechnik wird eine Rangliste erstellt. Die Punkte ergeben sich aus der Geschwindigkeit und der Präzision mit der die Aufgaben durchgeführt wurden. Der/die Teilnehmer/in mit den meisten Punkten bei einer Technik gewinnt einen Amazon-Gutschein im Wert von 10 €. Jede/r Teilnehmer/in kann somit maximal drei Gutscheine gewinnen. Sie können selber entscheiden, ob Sie an diesem Gewinnspiel teilnehmen möchten. Alle Teilnehmer/innen, die einen Gutschein gewonnen haben, werden am 1. April per E-Mail informiert und erhalten den entsprechenden Gutschein-Code.

Wie werden die Daten gespeichert?

Bis zum 1. April werden die Daten aller Teilnehmer/innen, die am Gewinnspiel teilnehmen pseudonymisiert gespeichert. Dies bedeutet, dass ein Kennzeichen verwendet wird, welches die zu Ihnen erfassten Daten auf die von Ihnen angegebenen E-Mail-Adresse zurückführt. Die Liste mit den Kennzeichen und die E-Mail-Adressen werden am 1. April gelöscht. Ab diesem Zeitpunkt sind die Daten anonymisiert und können somit nicht mehr auf Ihre Person zurückgeführt werden. Sollten sie nicht am Gewinnspiel teilnehmen, werden Ihre Daten sofort anonymisiert gespeichert. Die Daten werden auf einem Rechner abgelegt, der nur für den Studienleiter zugänglich ist.

Widerrufsrecht

Die Teilnahme an der Studie ist vollkommen freiwillig und kann jederzeit ohne Angaben von Gründen abgebrochen werden. Die Teilnahme am Gewinnspiel können Sie jederzeit zurücknehmen. Ihr Kennzeichen und Ihre E-Mail-Adresse werden dann umgehend gelöscht und Ihre Daten liegen nur noch anonymisiert vor.

Ausschlusskriterien

In dieser Studie wird mit einer VR-Brille gearbeitet, die die Fähigkeit des dreidimensionalen Sehens voraussetzt. Personen die hiermit Probleme haben, sind von der Studie ausgeschlossen. Ebenso sind Personen ausgeschlossen, die eine Rot-Grün-Schwäche oder ähnliche Farbschwächen aufweisen.

Ansprechpartner

Bei weiteren Fragen können Sie jeder Zeit Matthias Weise (matthias.weise@uni-potsdam.de) kontaktieren.

Einverständniserklärung

Ich _____
(Name, Vorname)

erkläre hiermit, dass ich die Informationen zu der Studie „Vergleich von VR-Interaktionstechniken“ gelesen habe.

Es wurden etwaige Fragen zu meiner Zufriedenheit beantwortet.

Eine Kopie der Informationsschrift und dieser Einwilligungserklärung habe ich erhalten.

Ich erkläre hiermit meine Zustimmung darüber, dass Informationen, die im Rahmen dieser Studie über mich gesammelt werden im Rahmen dieser Studie ausgewertet werden dürfen.

Ich weiß, dass ich diese Einverständniserklärung jederzeit, ohne Angaben von Gründen, widerrufen kann, ohne dass das nachteilige Folgen für mich hat.

Ich möchte am Gewinnspiel teilnehmen. Mir ist bewusst, dass meine Daten dann bis zum 1. April pseudonymisiert und anschließend anonymisiert gespeichert werden.

E-Mail-Adresse: _____

Mit der Vorgehensweise der Untersuchung bin ich einverstanden und ich bestätige dies mit meiner Unterschrift:

(Ort, Datum)

(Unterschrift)

A.5 Erklärung Interaktionstechniken

Die Funktionsweise der Techniken wurde den Nutzenden vor Durchführung der Aufgaben erklärt. Die Erklärungen wurden per Google Text-to-Speech erzeugt. Beispielhaft sind folgend die Erklärungen für die Techniken *Scaled Scrolling Worlds in Miniature + Scale* und *Expand* abgebildet. Die Erklärungen sind in Blöcke aufgeteilt. Der Studienleiter hatte nach jedem Block die Möglichkeit zu entscheiden, wann der nächste Block abgespielt werden soll.

Scaled Scrolling Worlds in Miniature + Scale

1. Mit dieser Interaktionstechnik können Sie Objekte auswählen, bewegen und rotieren. In der linken Hand befindet sich ein Miniaturmodell der Umgebung. Die weißen Linien sind die Grenzen des Miniaturmodells. Sie können die Umgebung im Miniaturmodell verschieben, indem Sie den rechten Controller in die Grenzen des Miniaturmodells bewegen und dann den Trigger des rechten Controllers drücken und gedrückt halten während Sie den rechten Controller bewegen.
2. Sie können das Miniaturmodell größer oder kleiner machen, indem Sie Ihren Daumen auf dem Touchpad des linken Controllers nach oben oder unten bewegen. Befindet sich dabei der rechte Controller in den Grenzen des Miniaturmodells, wird um den Auswahlpunkt des Controllers skaliert.
3. Mit dem rechten Controller können Sie Objekte durch Drücken des Triggers auswählen. Zum Verschieben oder Drehen von Objekten halten Sie den Trigger des rechten Controllers gedrückt.
4. Sie können das Objekt skalieren, indem Sie das Miniaturmodell größer oder kleiner machen, während Sie das Objekt halten.

Expand

1. Bei dieser Interaktionstechnik geht ein Kegel von ihrer rechten Hand aus. Wenn sie den Trigger drücken, werden alle Objekte die sich innerhalb des Kegels befinden vor Ihnen angeordnet.
2. Sie können das Zielobjekt nun auswählen, indem sie mit dem Kegel darauf zeigen und den Trigger drücken.
3. Mit dem rechten Controller können Sie Objekte durch Drücken des Triggers auswählen. Zum Verschieben oder Drehen von Objekten halten Sie den Trigger des rechten Controllers gedrückt.
4. Sie können die Anordnung von Objekten auch verlassen, indem sie kein Objekt auswählen.

A.6 Fragebögen

Persönlicher Fragebogen

* Required

1. ID *

2. Alter *

Mark only one oval.

- 16-22
 23-28
 29-34
 35-40
 41-46

3. Geschlecht *

Mark only one oval.

- männlich
 weiblich
 divers

4. Ordnen Sie sich bitte hinsichtlich Ihres Berufs, Ihres Studiums oder Ihrer Ausbildung einen der folgenden Bereiche zu.
*

Mark only one oval.

- Land-, Forst- und Tierwirtschaft und Gartenbau
 Rohstoffgewinnung, Produktion und Fertigung
 Bau, Architektur, Vermessung und Gebäudetechnik
 Naturwissenschaft, Geografie und Informatik
 Verkehr, Logistik, Schutz und Sicherheit
 Kaufmännische Dienstleistungen, Warenhandel, Vertrieb, Hotel und Tourismus
 Unternehmensorganisation, Buchhaltung, Recht und Verwaltung
 Gesundheit, Soziales, Lehre und Erziehung
 Sprach-, Literatur-, Geistes-, Gesellschafts- und Wirtschaftswissenschaften, Medien, Kunst, Kultur und Gestaltung
 Other: _____

5. Händigkeit *

Mark only one oval.

- Links
 Rechts

6. Brillenträger *

Mark only one oval.

- ja
 nein

7. Wie viele Stunden pro Jahr haben Sie die folgenden Geräte/Anwendungen in den letzten 3 Jahren verwendet? *

Mark only one oval per row.

	Nie	< 10 Stunden	< 50 Stunden	< 100 Stunden	> 100 Stunden
Computer	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Maus	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Touchscreen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Eingabegeräte mit Ganzkörperbewegungserkennung (z.B. Kinect)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Eingabegeräte mit Fingererkennung (z.B. Datenhandschuhe, Leap Motion)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Eingabegeräte mit Eye-Tracking	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
3D Controller (z.B. Wii Remote Controller, Playstation Move, Vive Controller, Oculus Rift Controller)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
3D Anwendungen (z.B. Blender, 3Ds Max, Unity)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
3D Computerspiele	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
VR/AR Anwendungen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

This content is neither created nor endorsed by Google.

Google Forms

Fragebogen zur Interaktionstechnik

* Required

1. ID *

Benutzerfreundlichkeit

2. Ich denke, dass ich die Interaktionstechnik gerne häufig benutzen würde. *

Mark only one oval.

	1	2	3	4	5	
Stimme überhaupt nicht zu	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Stimme voll zu

3. Ich fand die Interaktionstechnik unnötig komplex. *

Mark only one oval.

	1	2	3	4	5	
Stimme überhaupt nicht zu	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Stimme voll zu

4. Ich fand die Interaktionstechnik einfach zu benutzen. *

Mark only one oval.

	1	2	3	4	5	
Stimme überhaupt nicht zu	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Stimme voll zu

5. Ich glaube, ich würde die Hilfe einer technisch versierten Person benötigen, um die Interaktionstechnik benutzen zu können. *

Mark only one oval.

	1	2	3	4	5	
Stimme überhaupt nicht zu	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Stimme voll zu

6. Ich fand die verschiedenen Funktionen in dieser Interaktionstechnik waren gut integriert. *

Mark only one oval.

	1	2	3	4	5	
Stimme überhaupt nicht zu	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Stimme voll zu

7. Ich denke die Interaktionstechnik enthielt zu viele Inkonsistenzen. *

Mark only one oval.

1	2	3	4	5	
Stimme überhaupt nicht zu	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Stimme voll zu

8. Ich kann mir vorstellen, dass die meisten Menschen den Umgang mit dieser Interaktionstechnik sehr schnell lernen. *

Mark only one oval.

1	2	3	4	5	
Stimme überhaupt nicht zu	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Stimme voll zu

9. Ich fand die Interaktionstechnik sehr umständlich zu nutzen. *

Mark only one oval.

1	2	3	4	5	
Stimme überhaupt nicht zu	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Stimme voll zu

10. Ich fühlte mich bei der Benutzung der Interaktionstechnik sehr sicher. *

Mark only one oval.

1	2	3	4	5	
Stimme überhaupt nicht zu	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Stimme voll zu

11. Ich musste eine Menge lernen, bevor ich anfangen konnte die Interaktionstechnik zu verwenden. *

Mark only one oval.

1	2	3	4	5	
Stimme überhaupt nicht zu	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Stimme voll zu

Sonstiges

12. Wie sehr entsprach die Interaktionstechnik Handlungsabläufen, die Sie aus der realen Welt kennen? *

Mark only one oval.

1	2	3	4	5	
wenig	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	sehr

13. Wie viel Spaß hatten Sie bei der Interaktion mit der Interaktionstechnik? *

Mark only one oval.

1 2 3 4 5

wenig viel

14. Wie präzise konnten Sie mit der Interaktionstechnik arbeiten? *

Mark only one oval.

1 2 3 4 5

wenig sehr

15. Wie schnell konnten Sie mit der Interaktionstechnik arbeiten? *

Mark only one oval.

1 2 3 4 5

langsam schnell

16. Wie stark fühlten Sie sich unwohl (Übelkeit, Schwindel oder Kopfschmerzen) bei der Nutzung der Interaktionstechnik? *

Mark only one oval.

1 2 3 4 5

wenig sehr

17. Haben Sie noch weitere Anmerkungen zur Interaktionstechnik?

This content is neither created nor endorsed by Google.

Google Forms

NASA Task Load Index

Geben Sie jetzt für jede der untenstehenden Dimensionen an, wie hoch die Beanspruchung bei der Nutzung der Interaktionstechnik war. Setzen Sie bitte bei jeder Frage ein Kreuz in eines der 20 vorgegebenen Felder.

Geistige Anforderungen

Wie hoch waren die geistigen Anforderungen der Aufgaben?

Sehr gering Sehr hoch

Körperliche Anforderungen

Wie hoch waren die körperlichen Anforderungen der Aufgaben?

sehr gering sehr hoch

Zeitliche Anforderungen

Wie hoch war das Tempo, mit dem die einzelnen Arbeitsschritte der Aufgaben aufeinander folgten?

sehr gering sehr hoch

Leistung

Wie erfolgreich haben Sie die geforderte Aufgaben Ihrer Ansicht nach durchgeführt?

perfekter Erfolg Misserfolg

Anstrengung

Wie sehr mussten Sie sich anstrengen, um ihre Leistung zu erreichen?

sehr wenig Sehr stark

Frustration

Wie verunsichert, entmutigt, gereizt und verärgert waren Sie?

sehr wenig sehr stark

Abschließender Fragebogen Manipulation

* Required

1. ID *

2. Sortieren sie bitte die getesteten Techniken nach ihrer Präferenz. *

Mark only one oval per row.

	Platz 1	Platz 2	Platz 3
Technik 1	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Technik 2	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Technik 3	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

3. Was möchten Sie noch mitteilen?

This content is neither created nor endorsed by Google.

Google Forms

Abschließender Fragebogen Selektion

* Required

1. ID *

2. Sortieren sie bitte die getesteten Techniken nach ihrer Präferenz. *

Mark only one oval per row.

	Platz 1	Platz 2	Platz 3	Platz 4	Platz 5
Technik 1	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Technik 2	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Technik 3	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Technik 4	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Technik 5	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

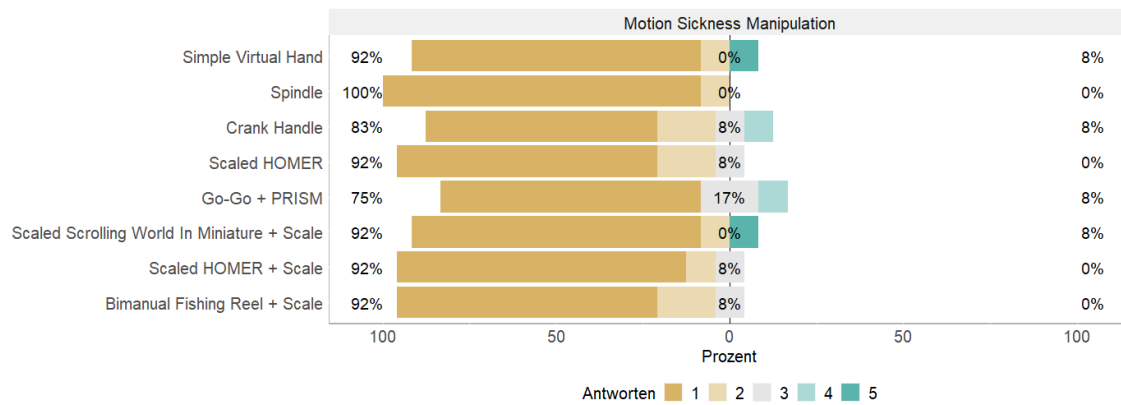
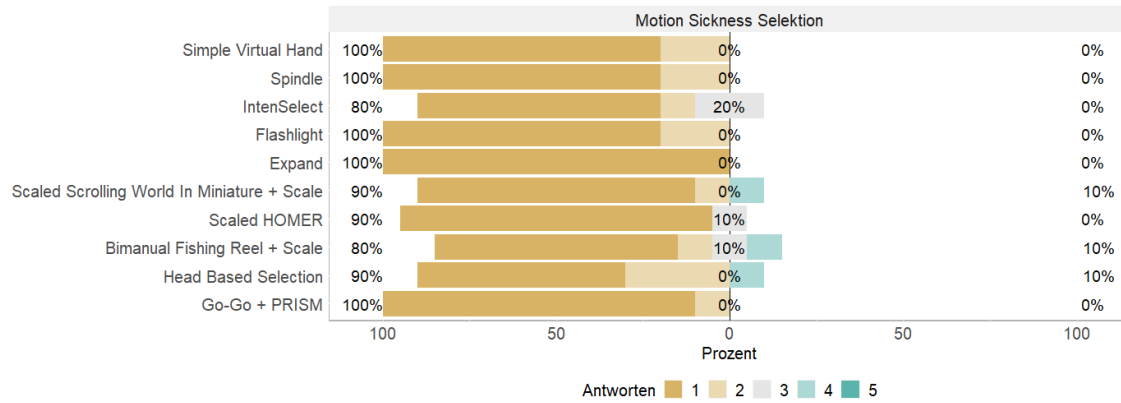
3. Was möchten Sie noch mitteilen?

This content is neither created nor endorsed by Google.

Google Forms

A.7 Diagramme Motion Sickness

Folgende zwei Grafiken zeigen die Antworten der Testpersonen auf die Frage „Wie stark fühlten Sie sich unwohl (Übelkeit, Schwindel oder Kopfschmerzen) bei der Nutzung der Interaktionstechnik?“ in der Selektions- und Manipulationsstudie.



A.8 Mittelwerte

Die folgenden Tabellen enthalten die Mittelwerte (\bar{x}) und die zugehörigen Standardabweichungen (SD) für jede Kombination der unabhängigen Variablen aus der Selektionsstudie (Zeit (s) und fehlerhafte Selektionen (Anzahl)) und der Manipulationsstudie (Zeit (s), Präzision Position (cm), Präzision Rotation ($^{\circ}$) und Präzision Skalierung (cm)). Für die Farbcodierung wird getrennt für den Mittelwert und die Standardabweichung eine Farbskala von grün (kleinster auftretender Wert) bis rot (größter auftretender Wert) verwendet, wobei gelb das 50-%-Quantil darstellt. Bei den Mittelwerten der subjektiven Einschätzungen wurden die Farbcodierungen getrennt für die Usability (0 = rot und 100 = grün), die NASA TLX Werte (0 = grün und 100 = rot), die einzelnen Fragen bzgl. Natürlichkeit, Spaß, Präzision und Geschwindigkeit (1 = rot und 5 = grün) und der Frage zur Motion Sickness (1 = grün und 5 = rot) angewendet, wobei der mittlere Wert gelb hinterlegt wird. Bei der Tabelle für die Manipulation ist diese Farbcodierung zusätzlich für jeden Manipulationstypen separat bestimmt worden. Beim Manipulationstyp stehen P, R und S für die Positionierung, Rotation und Skalierung. Für die Mittelwerte der erreichten Präzisionen in der Manipulationsstudie wurden nur die Ergebnisse der erfolgreich durchgeführten Aufgaben einbezogen. Unterstützt eine Technik ein Szenario nicht, ist die entsprechende Zelle grau gefärbt.

A.8.1 Selektion

Zeit

Distanz	Größe	Dichte	Simple Virtual Hand		Spindle		Inten-Select		Flash-light		Expand		Scaled Scrolling World In Miniature + Scale		Scaled HOMER		Bimanual Fishing Reel + Scale		Head Based Selection		Go-Go + PRISM	
			\bar{x}	SD	\bar{x}	SD	\bar{x}	SD	\bar{x}	SD	\bar{x}	SD	\bar{x}	SD	\bar{x}	SD	\bar{x}	SD	\bar{x}	SD	\bar{x}	SD
0,6 m	15 cm	Keine	0,72	0,26	0,82	0,27	0,61	0,15	0,56	0,12	0,66	0,16	0,63	0,18	0,60	0,15	0,62	0,14	1,62	0,36	1,40	0,65
		10 cm	0,89	0,28	0,97	0,20	0,80	0,17	0,83	0,30	0,88	0,27	0,90	0,34	0,73	0,12	0,79	0,22	1,81	0,20	1,73	0,85
		5 cm	0,82	0,35	0,83	0,23	0,68	0,16	0,67	0,15	0,79	0,18	0,97	0,47	0,63	0,14	0,65	0,15	1,58	0,30	1,30	0,52
	10 cm	Keine	0,79	0,22	0,95	0,33	0,62	0,14	0,59	0,12	0,64	0,09	0,71	0,31	0,65	0,14	0,67	0,20	1,63	0,16	1,64	0,69
		10 cm	0,80	0,29	0,94	0,23	0,74	0,22	0,71	0,23	0,86	0,25	0,93	0,47	0,73	0,20	0,78	0,25	1,77	0,26	1,71	0,63
		5 cm	0,79	0,24	0,86	0,18	0,72	0,18	0,67	0,13	0,79	0,16	0,96	0,58	0,61	0,11	0,71	0,18	1,59	0,15	1,57	0,62
	5 cm	Keine	0,96	0,37	1,08	0,32	0,71	0,22	0,69	0,26	0,75	0,19	0,72	0,21	0,90	0,37	0,96	0,29	2,07	0,52	1,98	0,90
		10 cm	0,96	0,22	1,01	0,23	0,85	0,19	0,81	0,16	0,97	0,24	1,52	1,06	0,92	0,21	0,98	0,23	2,29	0,43	2,00	0,61
		5 cm	0,90	0,21	1,07	0,32	0,83	0,19	0,83	0,23	1,78	0,77	1,51	1,08	0,86	0,16	0,95	0,25	1,97	0,37	1,86	0,48
3 m	15 cm	Keine	-	-	-	-	0,61	0,17	0,63	0,15	0,58	0,10	0,95	0,24	0,78	0,15	0,93	0,35	1,82	0,29	2,14	0,59
		10 cm	-	-	-	-	0,92	0,23	0,81	0,17	1,85	0,61	1,19	0,38	0,88	0,21	0,99	0,40	1,85	0,25	2,29	0,61
		5 cm	-	-	-	-	1,02	0,38	0,92	0,28	1,85	0,57	1,32	0,50	0,89	0,21	1,04	0,37	1,81	0,20	2,26	0,44
	10 cm	Keine	-	-	-	-	0,66	0,15	0,63	0,16	0,60	0,12	1,03	0,36	1,05	0,32	1,23	0,50	2,03	0,40	2,33	0,66
		10 cm	-	-	-	-	0,99	0,26	0,93	0,18	1,74	0,45	1,40	0,46	1,17	0,40	1,21	0,48	1,86	0,37	2,46	0,56
		5 cm	-	-	-	-	1,11	0,40	1,04	0,31	1,82	0,49	1,73	0,78	1,11	0,35	1,17	0,70	2,01	0,36	2,33	0,55
	5 cm	Keine	-	-	-	-	0,66	0,16	0,64	0,13	0,63	0,21	1,26	0,87	1,86	1,01	1,90	0,66	2,63	1,40	3,08	1,66
		10 cm	-	-	-	-	1,20	0,31	1,16	0,34	2,08	0,87	1,63	0,84	1,72	0,85	1,85	0,64	3,07	1,16	2,65	0,65
		5 cm	-	-	-	-	1,26	0,32	1,43	0,48	2,25	0,54	2,45	1,51	1,57	0,44	1,81	0,80	2,83	0,93	2,96	0,93
6 m	15 cm	Keine	-	-	-	-	0,69	0,17	0,69	0,18	0,66	0,18	1,51	0,73	1,27	0,45	1,33	0,51	2,17	0,49	3,03	0,96
		10 cm	-	-	-	-	1,09	0,33	1,26	0,43	1,90	0,45	1,58	0,46	1,39	0,74	1,65	0,71	2,16	0,79	3,56	1,83
		5 cm	-	-	-	-	1,33	0,57	1,47	0,77	1,97	0,59	1,68	0,41	1,44	0,75	1,62	1,18	2,09	0,42	3,17	1,66
	10 cm	Keine	-	-	-	-	0,77	0,19	0,69	0,16	0,69	0,19	1,64	0,99	2,04	1,08	2,64	1,82	2,47	0,74	4,21	2,16
		10 cm	-	-	-	-	1,28	0,45	1,51	0,95	1,99	0,74	1,95	1,19	2,04	1,21	2,45	1,50	2,52	1,00	3,90	1,49
		5 cm	-	-	-	-	1,78	1,47	1,66	0,50	1,94	0,59	2,21	0,93	2,24	1,60	2,40	1,38	2,57	0,47	3,27	0,78
	5 cm	Keine	-	-	-	-	0,75	0,23	0,76	0,22	0,69	0,11	3,04	4,05	7,00	7,76	7,09	6,82	6,58	5,64	5,67	2,82
		10 cm	-	-	-	-	1,45	0,61	1,57	0,71	2,36	0,83	2,81	1,87	4,37	5,26	8,13	8,44	5,22	5,02	4,86	2,74
		5 cm	-	-	-	-	1,92	0,58	2,12	1,08	2,77	1,14	2,88	1,20	8,38	9,16	5,48	3,99	6,96	7,45	6,71	5,84

A.8.2 Manipulation

Zeit

Typ	Distanz	Manipulationsgrad	Simple Virtual Hand		Spindle		Crank Handle		Scaled HOMER		Go-Go + PRISM		Scaled Scrolling World In Miniature + Scale		Scaled HOMER + Scale		Bimanual Fishing Reel + Scale	
			\bar{x}	SD	\bar{x}	SD	\bar{x}	SD	\bar{x}	SD	\bar{x}	SD	\bar{x}	SD	\bar{x}	SD	\bar{x}	SD
P	0,6 m	Niedrig	3,71	2,33	4,01	2,70	3,79	3,60	5,92	4,85	4,78	3,24	1,99	0,97	4,84	3,19	3,44	1,72
		Mittel	4,61	2,34	7,05	5,72	6,12	5,80	7,67	3,93	6,64	4,76	2,50	1,00	7,57	5,07	5,87	4,22
		Hoch	4,75	2,28	8,02	4,54	6,42	3,86	8,99	3,84	7,73	5,48	2,96	1,94	9,18	7,32	5,29	5,62
	3 m	Niedrig	-	-	-	-	2,57	2,40	5,18	3,95	3,95	1,96	3,28	3,71	2,98	1,92	3,11	2,23
		Mittel	-	-	-	-	3,47	2,37	6,33	4,16	4,54	2,22	3,49	3,20	6,18	6,53	4,75	4,55
		Hoch	-	-	-	-	5,71	3,85	7,44	5,21	5,77	3,11	3,04	2,02	6,30	4,24	4,00	2,43
	6 m	Niedrig	-	-	-	-	3,53	2,41	5,20	3,05	4,44	3,48	2,21	1,28	4,92	2,95	4,03	2,82
		Mittel	-	-	-	-	5,39	3,90	8,43	4,70	5,37	2,48	2,77	1,69	6,65	3,90	5,11	4,25
		Hoch	-	-	-	-	6,35	3,17	9,34	6,93	5,28	2,67	3,00	1,97	6,13	4,99	10,21	6,89
R	0,6 m	Niedrig	5,76	3,10	9,49	3,07	14,40	9,57	8,74	4,97	7,66	4,43	6,39	5,54	7,80	6,79	12,72	8,19
		Mittel	7,17	3,00	12,80	4,67	23,47	5,89	11,11	6,22	10,98	4,38	8,42	4,34	9,55	6,03	15,93	7,82
		Hoch	8,68	3,19	12,24	3,70	22,76	7,39	11,29	5,14	14,10	6,40	8,98	3,95	8,53	3,74	15,53	7,89
	3 m	Niedrig	-	-	-	-	9,37	6,83	9,52	4,15	7,03	3,60	4,56	2,24	6,69	4,80	7,90	3,03
		Mittel	-	-	-	-	23,00	6,30	12,56	3,66	11,91	4,85	8,19	5,92	8,16	4,32	11,09	4,39
		Hoch	-	-	-	-	19,53	7,99	13,62	5,43	11,69	3,70	9,24	4,48	10,85	6,06	11,82	4,77
	6 m	Niedrig	-	-	-	-	8,76	5,61	13,83	5,11	9,64	4,33	4,36	2,05	12,11	7,56	9,13	5,46
		Mittel	-	-	-	-	23,97	6,54	19,47	6,69	19,12	8,22	8,55	4,18	13,00	7,24	13,32	6,67
		Hoch	-	-	-	-	22,68	7,60	18,69	6,20	15,12	8,62	7,28	3,15	14,22	6,44	14,12	7,57
P+R	0,6 m	Niedrig	4,99	3,29	9,01	4,46	15,28	8,01	8,12	3,81	6,06	5,01	5,75	5,73	7,54	5,87	10,64	7,42
		Mittel	6,12	2,83	10,74	6,48	22,80	5,97	9,10	3,46	10,19	5,89	7,71	5,00	8,29	3,88	15,88	8,71
		Hoch	7,43	3,86	12,19	5,40	23,17	6,44	10,82	5,10	11,12	4,64	7,08	2,45	10,93	6,71	14,67	6,94
	3 m	Niedrig	-	-	-	-	11,13	6,76	10,31	4,07	9,80	4,36	5,07	2,31	6,85	5,73	9,01	4,66
		Mittel	-	-	-	-	21,46	7,77	13,30	4,51	11,45	5,41	6,47	3,16	9,52	4,90	12,64	5,67
		Hoch	-	-	-	-	23,05	6,64	15,49	6,79	16,91	7,65	9,60	4,91	11,34	4,67	15,32	5,93
	6 m	Niedrig	-	-	-	-	14,19	9,08	14,84	7,49	11,10	6,64	5,79	3,47	10,60	7,49	11,29	7,29
		Mittel	-	-	-	-	21,83	7,16	20,73	5,08	16,19	5,23	7,80	4,41	13,71	7,92	12,05	5,20
		Hoch	-	-	-	-	24,12	7,13	21,38	7,16	17,12	6,83	7,17	3,20	14,62	8,01	19,40	8,33
S	0,6 m	Niedrig	-	-	3,29	2,85	-	-	-	-	-	-	6,58	5,19	2,35	2,15	4,90	2,35
		Mittel	-	-	3,74	2,26	-	-	-	-	-	-	8,04	5,83	2,55	1,47	6,35	4,92
		Hoch	-	-	5,09	3,45	-	-	-	-	-	-	9,28	6,27	3,13	3,11	6,44	2,97
	3 m	Niedrig	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8,42	7,42	1,44	0,88	5,18	2,92
		Mittel	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6,66	4,08	1,76	0,72	5,48	2,26
		Hoch	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8,73	5,49	2,21	1,67	6,76	4,67
	6 m	Niedrig	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5,56	3,49	2,35	1,65	5,59	3,58
		Mittel	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5,80	4,33	2,13	1,38	6,75	5,49
		Hoch	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7,74	5,29	1,86	0,78	7,24	4,05
P+R+S	0,6 m	Niedrig	-	-	8,80	5,11	-	-	-	-	-	-	10,23	7,05	10,17	6,09	15,28	7,26
		Mittel	-	-	10,54	4,98	-	-	-	-	-	-	13,42	6,89	10,72	5,82	17,55	7,13
		Hoch	-	-	13,47	4,77	-	-	-	-	-	-	13,57	6,14	10,65	5,74	19,84	8,07
	3 m	Niedrig	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10,46	6,45	7,86	4,24	13,56	5,55
		Mittel	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10,91	5,24	9,64	3,75	15,04	6,53
		Hoch	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14,91	7,15	13,17	6,70	18,17	6,04
	6 m	Niedrig	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6,92	3,59	9,65	5,12	12,13	5,84
		Mittel	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12,31	7,01	11,08	4,50	16,34	6,76
		Hoch	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13,79	5,78	13,54	5,86	18,73	7,20

Präzision Position

Typ	Distanz	Manipulationsgrad	Simple Virtual Hand		Spindle		Crank Handle		Scaled HOMER		Go-Go + PRISM		Scaled Scrolling World In Miniature + Scale		Scaled HOMER + Scale		Bimanual Fishing Reel + Scale	
			\bar{x}	SD	\bar{x}	SD	\bar{x}	SD	\bar{x}	SD	\bar{x}	SD	\bar{x}	SD	\bar{x}	SD	\bar{x}	SD
P	0,6 m	Niedrig	1,07	0,69	1,44	0,89	1,26	0,91	1,40	1,02	2,03	1,76	2,38	1,23	1,71	0,87	1,24	0,79
		Mittel	1,32	0,77	1,33	0,79	1,51	1,30	1,57	1,45	1,48	1,31	3,62	2,13	1,28	0,59	1,53	0,95
		Hoch	1,30	0,65	1,37	0,85	2,22	1,72	2,34	1,85	2,55	2,24	3,32	1,73	2,07	1,52	1,81	1,30
	3 m	Niedrig	-	-	-	-	2,74	1,90	3,43	2,86	3,91	2,34	3,97	2,18	3,95	2,61	2,43	1,41
		Mittel	-	-	-	-	3,60	2,63	3,97	2,62	4,62	2,64	4,12	2,36	4,28	2,51	5,79	1,89
		Hoch	-	-	-	-	4,31	2,42	4,33	2,52	3,52	2,10	4,42	1,86	2,83	1,64	5,13	2,60
	6 m	Niedrig	-	-	-	-	4,48	2,25	3,47	1,95	4,27	2,79	3,78	2,55	3,85	2,30	2,74	1,08
		Mittel	-	-	-	-	4,17	2,51	5,22	2,67	4,48	2,72	4,16	2,48	4,59	2,43	4,28	1,91
		Hoch	-	-	-	-	3,61	2,33	4,53	2,65	3,87	1,83	3,72	2,14	3,56	2,24	5,97	2,70
R	0,6 m	Niedrig	1,15	0,61	1,53	0,72	1,64	1,21	1,26	0,48	1,75	1,28	4,20	2,18	1,22	0,69	1,91	1,20
		Mittel	1,27	0,64	2,09	1,10	1,78	1,02	1,82	1,49	1,46	0,74	3,29	1,70	1,98	1,13	1,32	0,79
		Hoch	1,13	0,96	1,68	0,75	1,71	1,01	1,45	1,32	1,38	1,20	3,53	2,28	1,55	0,91	1,65	0,79
	3 m	Niedrig	-	-	-	-	3,45	1,92	3,63	2,05	4,20	2,16	3,79	2,57	3,72	2,55	2,58	1,37
		Mittel	-	-	-	-	3,76	2,02	3,17	2,16	3,26	2,71	3,87	2,50	3,39	2,16	2,30	1,42
		Hoch	-	-	-	-	4,20	2,43	3,76	1,90	3,65	2,51	4,08	2,70	3,29	2,08	2,47	1,32
	6 m	Niedrig	-	-	-	-	3,91	2,05	4,88	1,98	3,70	2,14	3,99	2,35	4,96	2,20	3,19	1,61
		Mittel	-	-	-	-	4,05	2,58	5,18	2,33	4,23	2,50	4,37	2,69	4,37	2,11	3,38	1,66
		Hoch	-	-	-	-	3,81	2,99	4,52	2,37	5,16	2,56	4,07	2,32	4,77	2,79	3,68	1,71
P+R	0,6 m	Niedrig	1,21	0,69	1,78	1,40	2,06	1,29	1,82	1,89	2,15	1,83	3,00	1,37	1,61	0,93	1,62	0,92
		Mittel	1,17	0,83	1,74	1,53	2,77	2,24	1,89	1,20	1,75	1,16	3,70	2,34	1,86	1,62	1,57	0,90
		Hoch	1,18	0,85	2,00	1,58	1,87	0,88	1,78	1,76	1,57	1,13	3,58	2,01	1,87	1,44	1,72	1,01
	3 m	Niedrig	-	-	-	-	3,16	2,16	3,15	1,93	3,59	2,11	4,27	2,41	3,54	2,31	2,62	1,32
		Mittel	-	-	-	-	3,31	1,97	3,19	2,24	3,97	2,42	3,33	2,08	4,36	2,47	4,66	2,46
		Hoch	-	-	-	-	3,99	2,06	4,57	2,38	4,02	2,62	4,21	2,40	3,62	2,31	4,29	2,42
	6 m	Niedrig	-	-	-	-	3,48	2,17	3,38	2,11	4,98	2,64	3,49	1,85	5,34	2,74	3,10	1,43
		Mittel	-	-	-	-	4,21	2,20	5,19	2,53	4,03	2,12	4,36	2,51	3,58	2,11	4,76	2,62
		Hoch	-	-	-	-	4,31	2,29	3,56	2,42	3,77	2,10	4,20	2,35	3,82	2,08	5,23	2,23
S	0,6 m	Niedrig	-	-	1,77	1,35	-	-	-	-	-	-	4,51	2,31	1,18	2,11	1,30	0,80
		Mittel	-	-	2,22	1,52	-	-	-	-	-	-	5,15	2,28	1,61	1,99	1,68	1,08
		Hoch	-	-	2,46	2,28	-	-	-	-	-	-	4,81	1,98	1,63	2,13	2,47	1,14
	3 m	Niedrig	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,41	2,38	0,77	1,80	2,23	1,15
		Mittel	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,18	2,19	0,88	0,66	2,48	1,20
		Hoch	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5,21	2,29	1,22	0,87	2,29	1,16
	6 m	Niedrig	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,63	2,24	0,90	0,72	4,05	2,70
		Mittel	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5,21	2,21	0,94	1,34	2,96	2,05
		Hoch	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5,02	1,96	1,72	1,64	3,64	2,26
P+R+S	0,6 m	Niedrig	-	-	1,93	1,80	-	-	-	-	-	-	4,29	2,68	2,25	1,90	1,96	1,08
		Mittel	-	-	1,20	1,29	-	-	-	-	-	-	3,14	2,01	1,68	1,48	1,81	1,28
		Hoch	-	-	2,60	1,60	-	-	-	-	-	-	6,27	2,68	4,12	2,64	2,89	1,59
	3 m	Niedrig	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,51	2,29	3,23	1,97	2,91	1,73
		Mittel	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,02	2,04	3,51	2,25	4,41	2,08
		Hoch	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,25	2,24	3,81	2,85	3,97	2,39
	6 m	Niedrig	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,96	2,44	4,34	2,63	3,83	2,15
		Mittel	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5,04	2,68	4,42	2,29	4,63	2,92
		Hoch	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5,70	2,25	3,89	2,62	5,38	2,22

Präzision Rotation

Typ	Distanz	Manipulationsgrad	Simple Virtual Hand		Spindle		Crank Handle		Scaled HOMER		Go-Go + PRISM		Scaled Scrolling World In Miniature + Scale		Scaled HOMER + Scale		Bimanual Fishing Reel + Scale	
			\bar{x}	<i>SD</i>	\bar{x}	<i>SD</i>	\bar{x}	<i>SD</i>	\bar{x}	<i>SD</i>	\bar{x}	<i>SD</i>	\bar{x}	<i>SD</i>	\bar{x}	<i>SD</i>	\bar{x}	<i>SD</i>
P	0,6 m	Niedrig	4,36	3,56	3,52	2,44	0,73	3,10	5,92	4,15	4,80	3,00	3,91	2,51	5,77	3,16	0,25	0,51
		Mittel	3,87	1,55	3,30	2,38	1,01	1,87	5,30	3,88	4,31	2,24	5,88	3,03	5,01	2,46	1,52	2,99
		Hoch	4,33	2,03	4,71	4,32	2,77	3,92	7,42	4,98	5,70	3,61	6,23	3,12	5,79	3,80	0,26	0,66
	3 m	Niedrig	-	-	-	-	0,38	1,23	6,44	3,68	6,08	3,69	3,65	1,66	6,33	3,66	0,03	0,09
		Mittel	-	-	-	-	0,44	0,89	7,19	3,81	6,36	3,16	4,98	2,41	7,52	3,51	0,64	2,57
		Hoch	-	-	-	-	0,75	1,29	8,58	4,36	6,42	3,51	5,84	4,00	6,71	3,40	0,57	1,44
	6 m	Niedrig	-	-	-	-	0,64	2,09	10,15	4,53	8,09	3,82	3,91	1,51	7,76	3,36	0,45	1,72
		Mittel	-	-	-	-	0,25	0,41	9,18	4,96	7,22	3,69	5,56	2,34	9,06	3,28	0,50	1,29
		Hoch	-	-	-	-	1,06	2,20	9,16	4,84	8,44	4,53	5,79	3,23	9,99	4,16	0,77	2,72
R	0,6 m	Niedrig	4,70	3,43	5,98	3,35	6,53	4,76	5,58	4,14	7,19	4,33	6,97	5,06	4,97	3,34	6,46	3,13
		Mittel	4,51	3,18	5,49	3,49	10,67	5,08	6,77	4,86	5,68	3,19	5,77	2,42	5,58	2,90	5,92	3,84
		Hoch	3,62	2,39	3,90	2,25	12,18	4,45	4,84	4,96	7,38	5,40	7,49	6,12	5,92	3,95	6,52	2,88
	3 m	Niedrig	-	-	-	-	9,21	5,79	8,90	4,89	7,60	4,50	6,35	4,05	6,62	3,14	6,17	3,41
		Mittel	-	-	-	-	13,71	4,33	7,84	3,30	7,51	4,36	7,32	4,36	8,01	4,02	6,50	3,11
		Hoch	-	-	-	-	10,41	3,85	7,10	4,32	6,35	3,12	5,97	3,36	7,43	3,53	7,06	3,74
	6 m	Niedrig	-	-	-	-	8,47	4,56	10,35	4,28	8,17	3,76	7,88	5,10	9,15	4,99	8,15	6,04
		Mittel	-	-	-	-	11,31	4,43	12,57	5,27	10,49	5,02	6,71	4,76	9,38	4,51	8,89	4,78
		Hoch	-	-	-	-	12,62	4,34	10,07	4,54	8,09	4,31	7,20	3,67	8,18	4,71	7,03	3,55
P+R	0,6 m	Niedrig	4,31	2,09	6,30	5,25	9,23	6,04	6,11	4,67	6,95	3,95	5,83	3,40	5,71	3,93	6,01	3,04
		Mittel	4,09	2,45	5,71	3,95	11,36	5,34	5,35	3,77	6,67	5,27	6,51	3,85	6,89	4,25	6,72	3,80
		Hoch	4,00	1,97	6,41	4,28	11,71	5,99	5,56	3,51	6,93	4,57	7,23	4,30	5,95	3,60	5,26	3,81
	3 m	Niedrig	-	-	-	-	9,42	4,80	8,59	4,19	6,22	3,78	6,06	3,02	8,09	3,87	6,77	3,10
		Mittel	-	-	-	-	9,43	4,54	6,77	3,99	9,01	4,86	7,68	4,13	8,25	4,00	6,14	3,54
		Hoch	-	-	-	-	10,30	4,71	8,20	4,10	10,35	5,27	7,53	3,77	10,02	3,77	8,89	3,66
	6 m	Niedrig	-	-	-	-	8,24	5,00	10,86	4,39	7,92	3,98	6,84	4,51	8,94	4,34	7,66	5,22
		Mittel	-	-	-	-	12,85	3,24	8,90	3,46	8,61	4,04	7,37	4,43	9,51	4,55	9,27	5,12
		Hoch	-	-	-	-	11,16	4,73	10,16	4,60	9,34	4,17	7,33	4,12	11,84	4,85	8,96	4,74
S	0,6 m	Niedrig	-	-	2,03	2,13	-	-	-	-	-	-	4,03	2,10	3,04	2,41	0,23	0,64
		Mittel	-	-	2,49	2,03	-	-	-	-	-	-	4,58	2,36	4,11	3,45	0,18	0,25
		Hoch	-	-	1,82	0,98	-	-	-	-	-	-	4,18	2,01	3,06	1,99	0,45	0,85
	3 m	Niedrig	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,46	2,48	0,99	0,66	0,24	0,80
		Mittel	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,81	2,52	1,34	0,89	0,21	0,80
		Hoch	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,38	1,78	1,44	1,58	0,48	1,71
	6 m	Niedrig	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,30	1,61	1,20	1,48	0,03	0,08
		Mittel	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,82	1,58	1,35	2,29	0,12	0,44
		Hoch	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,26	2,99	0,90	0,50	0,05	0,09
P+R+S	0,6 m	Niedrig	-	-	4,70	4,31	-	-	-	-	-	-	5,57	3,20	7,14	3,51	5,09	3,73
		Mittel	-	-	6,50	4,67	-	-	-	-	-	-	6,35	4,24	9,16	5,06	7,69	3,83
		Hoch	-	-	5,08	4,66	-	-	-	-	-	-	4,73	2,37	5,82	3,18	3,98	2,45
	3 m	Niedrig	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6,66	3,97	6,79	3,95	6,98	4,91
		Mittel	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5,54	4,01	5,62	3,00	5,42	2,70
		Hoch	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6,26	3,64	7,28	5,28	6,48	3,59
	6 m	Niedrig	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5,35	3,39	8,17	5,14	5,90	2,36
		Mittel	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,72	2,60	6,55	3,83	6,19	3,21
		Hoch	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5,14	2,16	7,40	3,22	4,86	2,52

Präzision Skalierung

Typ	Distanz	Manipulationsgrad	Simple Virtual Hand		Spindle		Crank Handle		Scaled HOMER		Go-Go + PRISM		Scaled Scrolling World In Miniature + Scale		Scaled HOMER + Scale		Bimanual Fishing Reel + Scale	
			\bar{x}	SD	\bar{x}	SD	\bar{x}	SD	\bar{x}	SD	\bar{x}	SD	\bar{x}	SD	\bar{x}	SD	\bar{x}	SD
P	0,6 m	Niedrig	0,00	0,00	1,04	0,87	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	0,33	0,00	0,00
		Mittel	0,00	0,00	0,88	0,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08	0,31	0,02	0,11
		Hoch	0,00	0,00	0,63	0,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,19	0,00	0,00
	3 m	Niedrig	-	-	-	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	0,50	0,00	0,00
		Mittel	-	-	-	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09	0,31	0,49	1,14	0,07	0,34
		Hoch	-	-	-	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,23	0,78	0,00	0,00
	6 m	Niedrig	-	-	-	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,07	0,04	0,18	0,00	0,00
		Mittel	-	-	-	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16	0,46	0,07	0,34
		Hoch	-	-	-	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,12	0,45	0,10	0,38
R	0,6 m	Niedrig	0,00	0,00	0,54	0,44	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00
		Mittel	0,00	0,00	1,13	0,93	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,14	0,39	0,19	0,68	0,00	0,00
		Hoch	0,00	0,00	0,85	0,82	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,09	0,06	0,29	0,00	0,00
	3 m	Niedrig	-	-	-	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,07	0,00	0,00
		Mittel	-	-	-	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09	0,32	0,00	0,00
		Hoch	-	-	-	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,16	0,00	0,00
	6 m	Niedrig	-	-	-	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,56	1,12	0,00	0,00
		Mittel	-	-	-	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,13	0,61	0,00	0,00
		Hoch	-	-	-	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,33	0,89	0,00	0,00
P+R	0,6 m	Niedrig	0,00	0,00	1,04	0,99	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	0,29
		Mittel	0,00	0,00	0,91	0,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,18	0,47	0,03	0,11	0,00	0,00
		Hoch	0,00	0,00	1,04	1,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,20	0,72	0,03	0,15
	3 m	Niedrig	-	-	-	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	0,39	0,00	0,00
		Mittel	-	-	-	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,11	0,53	0,00	0,00
		Hoch	-	-	-	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	0,27	0,12	0,51	0,00	0,00
	6 m	Niedrig	-	-	-	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,33	0,84	0,00	0,00
		Mittel	-	-	-	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,21	0,29	0,82	0,08	0,40
		Hoch	-	-	-	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,22	0,76	0,00	0,00
S	0,6 m	Niedrig	-	-	1,22	1,20	-	-	-	-	-	-	1,10	1,39	1,17	1,17	0,65	0,47
		Mittel	-	-	1,80	1,79	-	-	-	-	-	-	2,24	1,59	1,80	1,70	1,20	0,93
		Hoch	-	-	2,03	2,23	-	-	-	-	-	-	2,61	1,87	1,51	1,19	1,52	1,44
	3 m	Niedrig	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,63	1,72	1,59	1,20	0,91	0,64
		Mittel	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,27	1,56	1,66	1,01	1,23	1,05
		Hoch	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,30	1,95	2,81	1,42	1,14	0,82
	6 m	Niedrig	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,33	1,75	2,01	1,18	1,82	1,71
		Mittel	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,36	2,13	2,52	1,89	1,37	1,35
		Hoch	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,10	2,13	2,65	1,62	1,55	1,01
P+R+S	0,6 m	Niedrig	-	-	1,15	1,25	-	-	-	-	-	-	1,65	1,14	0,93	1,06	0,94	0,72
		Mittel	-	-	0,76	0,82	-	-	-	-	-	-	0,98	0,69	0,68	0,51	0,78	0,54
		Hoch	-	-	1,77	1,58	-	-	-	-	-	-	2,54	2,01	2,60	2,22	1,62	1,50
	3 m	Niedrig	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,63	1,20	1,64	1,18	0,92	0,76
		Mittel	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,13	1,33	1,62	1,15	0,80	0,58
		Hoch	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,81	1,51	1,23	0,97	0,93	1,05
	6 m	Niedrig	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,58	1,53	2,26	1,75	1,17	0,90
		Mittel	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,79	1,35	2,70	1,76	1,32	1,33
		Hoch	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,95	1,47	2,00	1,51	1,39	0,87

Subjektive Einschätzungen

Variable	Simple Virtual Hand		Spindle		Crank Handle		Scaled HOMER		Go-Go + PRISM		Scaled Scrolling World In Miniature + Scale		Scaled HOMER + Scale		Bimanual Fishing Reel + Scale	
	\bar{x}	SD	\bar{x}	SD	\bar{x}	SD	\bar{x}	SD	\bar{x}	SD	\bar{x}	SD	\bar{x}	SD	\bar{x}	SD
Usability	95,83	7,02	87,71	11,89	32,71	24,23	58,96	23,02	59,17	25,05	65,83	15,53	75,00	25,25	67,08	26,02
NASA Gesamt	25,83	9,87	28,92	11,07	64,17	17,64	45,83	21,52	51,25	18,51	37,42	17,70	35,92	17,75	41,58	20,22
Mentale Anforderungen	17,08	13,22	30,83	26,53	70,83	22,75	36,25	29,86	47,92	26,84	54,58	26,92	35,42	30,86	52,50	29,96
Physische Anforderungen	39,58	25,36	37,08	23,98	56,67	27,08	55,00	20,11	54,58	26,75	28,33	23,77	37,50	26,76	28,75	19,79
Leistung	20,42	13,73	26,25	18,48	57,92	28,48	37,50	25,36	45,83	21,09	36,67	25,26	28,33	16,14	38,75	26,47
Aufwand	43,33	19,69	37,08	13,22	73,75	22,17	59,58	23,30	65,00	19,31	47,50	22,21	56,67	19,92	55,42	24,63
Frustration	8,75	4,33	13,33	9,85	61,67	19,69	40,83	35,02	42,92	30,93	20,00	17,32	21,67	18,38	32,50	27,59
Natürlichkeit	4,33	0,98	4,00	1,13	1,58	1,00	3,00	1,41	2,83	1,27	2,75	1,36	3,50	1,24	3,08	1,24
Spaß	4,17	0,94	4,67	0,49	2,00	1,35	3,25	1,36	3,25	1,71	4,17	0,94	3,83	1,27	3,50	1,31
Präzision	4,25	0,97	4,17	0,72	1,83	1,03	2,92	1,16	3,00	1,21	3,67	1,23	4,00	1,35	3,42	1,24
Geschwindigkeit	4,67	0,49	4,42	0,79	2,00	1,04	3,17	1,19	3,08	1,16	3,83	0,94	3,67	1,07	3,58	1,38
Motion Sickness	1,42	1,16	1,08	0,29	1,58	1,00	1,33	0,65	1,58	1,08	1,42	1,16	1,25	0,62	1,33	0,65

A.9 Korrelationen

Die im Folgenden dargestellten Diagramme und Tabellen liefern weitere Details zu denen im Kapitel 4.5 angesprochenen Korrelationen. Die Stärke der Farben in den Tabellen gibt die Stärke der Korrelation an. Blau steht dabei für eine positive und rot für eine negative Korrelation. Die Korrelationen wurden ebenfalls nach Spearman bestimmt, und wie bereits in Kapitel 4.5 begründet, wird in eine schwache ($0,1 \leq \rho < 0,4$ bzw. $-0,1 \geq \rho > -0,4$), moderate ($0,4 \leq \rho < 0,7$ bzw. $-0,4 \geq \rho > -0,7$) und starke ($0,7 \leq \rho < 1$ bzw. $-0,7 \geq \rho > -1$) Korrelation unterschieden.

A.9.1 Fragebögen

Die folgend dargestellten Korrelationen zeigen den Einfluss des Alters, der Händigkeit, des Geschlechts und der erfassten Erfahrungen der Testpersonen mit verschiedenen Eingabegeräten und Anwendungen auf die gemessenen Zeiten. Die Korrelationen wurden ebenfalls nach Spearman bestimmt. Nur für das Geschlecht und die Händigkeit wurde eine punktbiserial Korrelation verwendet, da die beiden Variablen nominal und dichotom sind (Cleff, 2011). Bei grau hinterlegten Zellen haben die Testpersonen keine unterschiedlichen Angaben für diese Variable gemacht, weshalb keine Korrelationskoeffizienten bestimmt werden konnten. Es wurde davon abgesehen, hier auch die Korrelationen mit den erfassten Präzisionswerten anzugeben, da diese, aufgrund der nur vereinzelt auftretenden fehlerhaften Selektionen (siehe Kapitel 4.5.1) und der schwer zu erreichenden hohen Genauigkeit auf große Distanz (siehe Kapitel 4.5.2), wenig Aussagekraft haben.

Selektion

Interaktionstechnik	Körpererkennung		Fingererkennung		Eye-Tracking		3D Controller		3D Anwendungen	
	ρ	p	ρ	p	ρ	p	ρ	p	ρ	p
Simple Virtual Hand	0,32	0,00	-0,25	0,00	-0,21	0,00	-0,19	0,00	-0,29	0,00
Spindle	0,09	0,12	-0,26	0,00	-0,35	0,00	-0,04	0,52	-0,33	0,00
IntenSelect	0,12	0,00	-0,09	0,01	0,01	0,68	0,07	0,04	-0,12	0,00
Flashlight	-0,03	0,45	-0,12	0,00	-0,25	0,00	0,04	0,22	-0,21	0,00
Expand	-0,04	0,23	-0,16	0,00	-0,22	0,00	-0,14	0,00	0,01	0,69
Scaled Scrolling World In Miniature + Scale	0,02	0,67	-0,05	0,13	-0,07	0,05	-0,13	0,00	-0,11	0,00
Scaled HOMER	-0,02	0,49	-0,09	0,01	-0,14	0,00	-0,19	0,00	-0,17	0,00
Bimanual Fishing Reel + Scale	0,02	0,65	-0,11	0,00	-0,10	0,00	-0,15	0,00	-0,10	0,00
Head Based Selection	0,08	0,03	-0,10	0,00	-0,11	0,00	0,00	0,89	-0,14	0,00
Go-Go + PRISM	-0,02	0,51	-0,22	0,00	-0,20	0,00	-0,10	0,00	-0,12	0,00

Interaktionstechnik	3D Computerspiele		VR/AR Anwendungen		Alter		Händigkeit		Geschlecht	
	ρ	p	ρ	p	ρ	p	ρ	p	ρ	p
Simple Virtual Hand	-0,18	0,00	-0,10	0,09	-0,12	0,04	-	-	0,35	0,00
Spindle	-0,03	0,60	-0,22	0,00	-0,08	0,16	-	-	0,34	0,00
IntenSelect	-0,02	0,59	-0,01	0,86	-0,12	0,00	-	-	0,11	0,00
Flashlight	-0,05	0,18	-0,18	0,00	-0,04	0,30	-	-	0,07	0,05
Expand	-0,07	0,05	-0,11	0,00	0,04	0,31	-	-	0,08	0,02
Scaled Scrolling World In Miniature + Scale	-0,07	0,03	-0,09	0,01	0,00	0,94	-	-	0,09	0,01
Scaled HOMER	-0,02	0,57	-0,16	0,00	-0,06	0,08	-	-	0,07	0,05
Bimanual Fishing Reel + Scale	-0,12	0,00	-0,10	0,00	0,06	0,09	-	-	0,08	0,02
Head Based Selection	-0,18	0,00	0,03	0,37	0,00	0,99	-	-	0,10	0,00
Go-Go + PRISM	-0,14	0,00	-0,15	0,00	0,01	0,79	-	-	0,04	0,21

Manipulation

Interaktionstechnik	Körpererkennung		Fingererkennung		Eye-Tracking		3D Controller		3D Anwendungen	
	ρ	p	ρ	p	ρ	p	ρ	p	ρ	p
Simple Virtual Hand	-0,10	0,14	0,35	0,00	-0,04	0,51	-0,08	0,23	-0,02	0,72
Spindle	-0,16	0,00	-0,06	0,22	0,14	0,01	-0,15	0,00	-0,12	0,03
Crank Handle	-0,09	0,02	-0,10	0,01	-0,06	0,11	-0,10	0,01	0,03	0,51
Scaled HOMER	-0,17	0,00	-0,08	0,05	0,16	0,00	-0,31	0,00	-0,05	0,18
Go-Go + PRISM	-0,09	0,02	-0,20	0,00	0,00	0,94	-0,36	0,00	0,01	0,80
Scaled Scrolling World In Miniature + Scale	-0,05	0,14	-0,03	0,40	0,11	0,00	0,05	0,12	-0,01	0,85
Scaled HOMER + Scale	-0,01	0,72	0,01	0,65	-0,07	0,02	0,18	0,00	-0,14	0,00
Bimanual Fishing Reel + Scale	-0,10	0,00	0,28	0,00	0,17	0,00	-0,06	0,04	-0,13	0,00

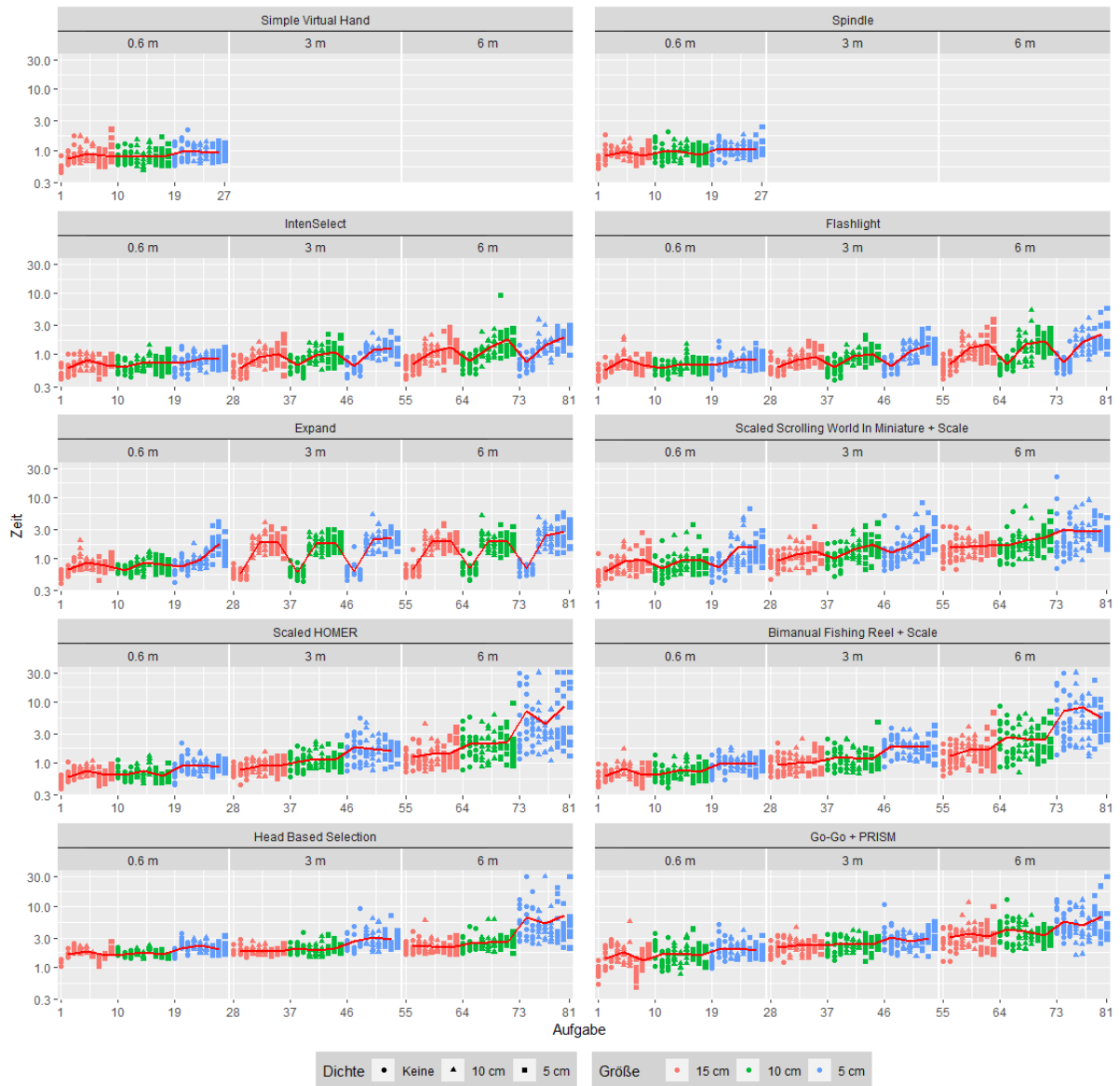
Interaktionstechnik	3D Computerspiele		VR/AR Anwendungen		Alter		Händigkeit		Geschlecht	
	ρ	p	ρ	p	ρ	p	ρ	p	ρ	p
Simple Virtual Hand	-0,17	0,01	-0,23	0,00	-0,38	0,00	-0,13	0,05	0,34	0,00
Spindle	-0,09	0,11	-0,05	0,35	0,23	0,00	-	-	0,14	0,01
Crank Handle	-0,05	0,20	-0,07	0,08	0,02	0,68	0,05	0,20	0,10	0,01
Scaled HOMER	-0,27	0,00	-0,13	0,00	-0,07	0,09	-	-	0,32	0,00
Go-Go + PRISM	-0,04	0,28	-0,14	0,00	-0,09	0,03	0,11	0,00	0,31	0,00
Scaled Scrolling World In Miniature + Scale	0,16	0,00	-0,01	0,86	0,13	0,00	-0,14	0,00	0,20	0,00
Scaled HOMER + Scale	-0,26	0,00	-0,25	0,00	-0,10	0,00	-0,04	0,21	0,40	0,00
Bimanual Fishing Reel + Scale	-0,24	0,00	-0,30	0,00	-0,16	0,00	-0,04	0,18	0,21	0,00

A.9.2 Selektion

Um die Erkennung der Korrelationen in der Selektionsstudie zu unterstützen, folgt ein Streudiagramm, das die einzelnen erfassten Zeiten für die Durchführung einer Aufgabe darstellt. Auf der y-Achse ist die Zeit auf einer logarithmischen Skala und auf der x-Achse die fortlaufende Nummer der Aufgaben angegeben. Die laufende Nummer dient nur der Identifikation der Aufgabe, und beschreibt nicht die Reihenfolge, in der die Aufgaben durchgeführt wurden. Die drei Abschnitte zu einer Technik geben die Distanz zum Aufgabenobjekt an, die Form des Messpunktes beschreibt die Dichte bei der Aufgabe und die Farbe die Größe der Aufgabenobjekte. Die rote Linie visualisiert die Mittelwerte aller Aufgaben einer Variablenkombination. Bei den Aufgaben 1-3 waren die Objekte somit z.B. 0,6 m entfernt, einzeln und hatten eine Größe von 15 cm. Die Zeiten dieser drei Aufgaben entsprechen einem Mittelwert für die rote Linie. Es wurde davon abgesehen, auch die fehlerhaften Selektionen in dieser Form darzustellen, da hieraus kein Mehrwert zur Abbildung 4.19 entsteht.

Des Weiteren wurden detaillierte Korrelationen zwischen den unabhängigen Variablen und den gemessenen Zeiten bzw. der fehlerhaften Selektion bestimmt. Dabei wurde jeweils für zwei Variablen eine Ausprägung angenommen und für die übrige Variable die Korrelationen in dem dadurch entstehenden Szenario berechnet. Graue Zellen bedeuten, dass die Technik das Szenario nicht unterstützt oder nicht genügend Daten zur Berechnung einer Korrelation vorhanden waren (fehlendes Auftreten von fehlerhaften Selektionen).

Zeit



Distanz	Größe	Dichte	Simple Virtual Hand		Spindle		IntenSelect		Flashlight		Expand	
			ρ	p	ρ	p	ρ	p	ρ	p	ρ	p
0.6 m	15 cm	X	-0,13	0,23	-0,02	0,79	-0,18	0,06	-0,20	0,01	-0,24	0,00
0.6 m	10 cm	X	0,00	0,97	0,14	0,43	-0,22	0,02	-0,19	0,02	-0,32	0,00
0.6 m	5 cm	X	0,10	0,92	0,02	0,75	-0,24	0,02	-0,24	0,01	-0,65	0,00
0.6 m	X	Keine	-0,33	0,00	-0,33	0,00	-0,25	0,04	-0,30	0,01	-0,23	0,02
0.6 m	X	10 cm	-0,11	0,16	-0,09	0,40	-0,10	0,36	0,04	0,53	-0,14	0,05
0.6 m	X	5 cm	-0,12	0,01	-0,35	0,00	-0,33	0,00	-0,34	0,00	-0,62	0,00
3 m	15 cm	X	-	-	-	-	-0,53	0,00	-0,49	0,00	-0,68	0,00
3 m	10 cm	X	-	-	-	-	-0,53	0,00	-0,58	0,00	-0,74	0,00
3 m	5 cm	X	-	-	-	-	-0,65	0,00	-0,68	0,00	-0,70	0,00
3 m	X	Keine	-	-	-	-	-0,14	0,13	-0,02	0,58	-0,12	0,48
3 m	X	10 cm	-	-	-	-	-0,39	0,00	-0,51	0,00	-0,14	0,30
3 m	X	5 cm	-	-	-	-	-0,27	0,00	-0,50	0,00	-0,29	0,00
6 m	15 cm	X	-	-	-	-	-0,56	0,00	-0,52	0,00	-0,72	0,00
6 m	10 cm	X	-	-	-	-	-0,42	0,00	-0,53	0,00	-0,63	0,00
6 m	5 cm	X	-	-	-	-	-0,69	0,00	-0,60	0,00	-0,70	0,00
6 m	X	Keine	-	-	-	-	-0,13	0,42	-0,14	0,19	-0,09	0,04
6 m	X	10 cm	-	-	-	-	-0,30	0,00	-0,18	0,07	-0,27	0,03
6 m	X	5 cm	-	-	-	-	-0,24	0,00	-0,31	0,00	-0,37	0,00
X	15 cm	Keine	-	-	-	-	0,22	0,06	0,34	0,00	0,01	0,98
X	15 cm	10 cm	-	-	-	-	0,43	0,00	0,48	0,00	0,61	0,00
X	15 cm	5 cm	-	-	-	-	0,55	0,00	0,57	0,00	0,66	0,00
X	10 cm	Keine	-	-	-	-	0,37	0,00	0,25	0,02	0,16	0,53
X	10 cm	10 cm	-	-	-	-	0,57	0,00	0,51	0,00	0,64	0,00
X	10 cm	5 cm	-	-	-	-	0,45	0,00	0,76	0,00	0,67	0,00
X	5 cm	Keine	-	-	-	-	0,09	0,48	0,13	0,06	-0,11	0,61
X	5 cm	10 cm	-	-	-	-	0,52	0,00	0,57	0,00	0,60	0,00
X	5 cm	5 cm	-	-	-	-	0,75	0,00	0,61	0,00	0,43	0,00

Distanz	Größe	Dichte	Scaled Scrolling World In Miniature + Scale		Scaled HOMER		Bimanual Fishing Reel + Scale		Head Based Selection		Go-Go + PRISM	
			ρ	p	ρ	p	ρ	p	ρ	p	ρ	p
0.6 m	15 cm	X	-0,38	0,00	-0,08	0,41	-0,07	0,56	0,05	0,60	0,06	0,74
0.6 m	10 cm	X	-0,22	0,00	0,10	0,37	-0,07	0,29	0,08	0,41	0,05	0,78
0.6 m	5 cm	X	-0,34	0,00	0,06	0,77	0,01	0,92	0,09	0,41	0,07	0,97
0.6 m	X	Keine	-0,17	0,03	-0,45	0,00	-0,53	0,00	-0,43	0,00	-0,30	0,00
0.6 m	X	10 cm	-0,34	0,00	-0,38	0,00	-0,31	0,00	-0,51	0,00	-0,15	0,02
0.6 m	X	5 cm	-0,28	0,00	-0,53	0,00	-0,52	0,00	-0,47	0,00	-0,39	0,00
3 m	15 cm	X	-0,37	0,00	-0,23	0,05	-0,12	0,22	0,02	0,63	-0,09	0,13
3 m	10 cm	X	-0,46	0,00	-0,07	0,52	0,04	0,62	0,02	0,89	0,00	0,79
3 m	5 cm	X	-0,40	0,00	0,15	0,64	0,06	0,29	-0,07	0,03	0,04	0,79
3 m	X	Keine	-0,23	0,09	-0,58	0,00	-0,61	0,00	-0,36	0,00	-0,34	0,00
3 m	X	10 cm	-0,29	0,00	-0,53	0,00	-0,56	0,00	-0,55	0,00	-0,24	0,03
3 m	X	5 cm	-0,41	0,00	-0,63	0,00	-0,43	0,00	-0,58	0,00	-0,39	0,00
6 m	15 cm	X	-0,13	0,02	-0,11	0,82	-0,14	0,49	0,06	0,41	-0,04	0,61
6 m	10 cm	X	-0,22	0,00	-0,06	0,83	0,06	0,91	-0,05	0,06	0,24	0,07
6 m	5 cm	X	0,02	0,01	-0,07	0,74	0,10	0,96	-0,02	0,38	-0,10	0,87
6 m	X	Keine	-0,25	0,01	-0,46	0,00	-0,50	0,00	-0,47	0,00	-0,46	0,00
6 m	X	10 cm	-0,36	0,00	-0,36	0,00	-0,47	0,00	-0,38	0,00	-0,25	0,02
6 m	X	5 cm	-0,48	0,00	-0,46	0,00	-0,53	0,00	-0,42	0,00	-0,38	0,00
X	15 cm	Keine	0,63	0,00	0,69	0,00	0,63	0,00	0,51	0,00	0,67	0,00
X	15 cm	10 cm	0,58	0,00	0,52	0,00	0,59	0,00	0,29	0,00	0,53	0,00
X	15 cm	5 cm	0,54	0,00	0,59	0,00	0,49	0,00	0,55	0,00	0,60	0,00
X	10 cm	Keine	0,52	0,00	0,66	0,00	0,60	0,00	0,57	0,00	0,62	0,00
X	10 cm	10 cm	0,47	0,00	0,59	0,00	0,60	0,00	0,44	0,00	0,68	0,00
X	10 cm	5 cm	0,55	0,00	0,58	0,00	0,62	0,00	0,75	0,00	0,73	0,00
X	5 cm	Keine	0,38	0,00	0,49	0,00	0,54	0,00	0,49	0,00	0,62	0,00
X	5 cm	10 cm	0,38	0,00	0,43	0,00	0,52	0,00	0,38	0,00	0,58	0,00
X	5 cm	5 cm	0,40	0,00	0,51	0,00	0,62	0,00	0,43	0,00	0,51	0,00

Fehlerhafte Selektionen

Distanz	Größe	Dichte	Simple Virtual Hand		Spindle		IntenSelect		Flashlight		Expand	
			ρ	p	ρ	p	ρ	p	ρ	p	ρ	p
0.6 m	10 cm	X	0,14	0,20	0,19	0,07	-0,13	0,22	-	-	-	-
0.6 m	15 cm	X	-0,08	0,43	0,20	0,06	-	-	-	-	0,09	0,39
0.6 m	5 cm	X	0,18	0,10	0,10	0,35	0,00	1,00	0,00	1,00	-0,08	0,48
0.6 m	X	10 cm	0,10	0,35	0,08	0,48	-0,18	0,08	-	-	0,13	0,22
0.6 m	X	Keine	-0,12	0,27	-0,04	0,71	-	-	-0,13	0,22	0,00	1,00
0.6 m	X	5 cm	0,14	0,19	-0,15	0,15	0,00	1,00	-0,13	0,22	-0,18	0,08
3 m	10 cm	X	-	-	-	-	-0,24	0,02	-0,05	0,61	-	-
3 m	15 cm	X	-	-	-	-	-0,16	0,12	-0,15	0,15	-0,15	0,15
3 m	5 cm	X	-	-	-	-	-0,18	0,09	-0,29	0,01	0,09	0,39
3 m	X	10 cm	-	-	-	-	-0,23	0,03	0,06	0,58	0,00	1,00
3 m	X	Keine	-	-	-	-	-	-	-0,09	0,39	-0,13	0,22
3 m	X	5 cm	-	-	-	-	-0,07	0,49	-0,21	0,05	0,18	0,08
6 m	10 cm	X	-	-	-	-	-0,28	0,01	-0,15	0,15	0,13	0,21
6 m	15 cm	X	-	-	-	-	-0,22	0,04	-0,20	0,05	0,00	1,00
6 m	5 cm	X	-	-	-	-	-0,46	0,00	-0,36	0,00	-0,18	0,09
6 m	X	10 cm	-	-	-	-	-0,05	0,64	-0,06	0,56	0,05	0,61
6 m	X	Keine	-	-	-	-	-	-	0,09	0,39	0,00	1,00
6 m	X	5 cm	-	-	-	-	-0,27	0,01	-0,14	0,18	-0,23	0,03
X	10 cm	10 cm	-	-	-	-	0,10	0,34	0,29	0,00	0,18	0,08
X	10 cm	Keine	-	-	-	-	-	-	0,09	0,39	0,18	0,08
X	10 cm	5 cm	-	-	-	-	0,19	0,07	0,25	0,02	-	-
X	15 cm	10 cm	-	-	-	-	0,12	0,26	0,27	0,01	0,12	0,26
X	15 cm	Keine	-	-	-	-	-	-	0,13	0,22	-0,13	0,22
X	15 cm	5 cm	-	-	-	-	0,20	0,05	0,29	0,01	0,00	1,00
X	5 cm	10 cm	-	-	-	-	0,04	0,73	0,36	0,00	0,15	0,15
X	5 cm	Keine	-	-	-	-	-	-	-0,09	0,39	-0,09	0,39
X	5 cm	5 cm	-	-	-	-	0,44	0,00	0,32	0,00	0,06	0,58

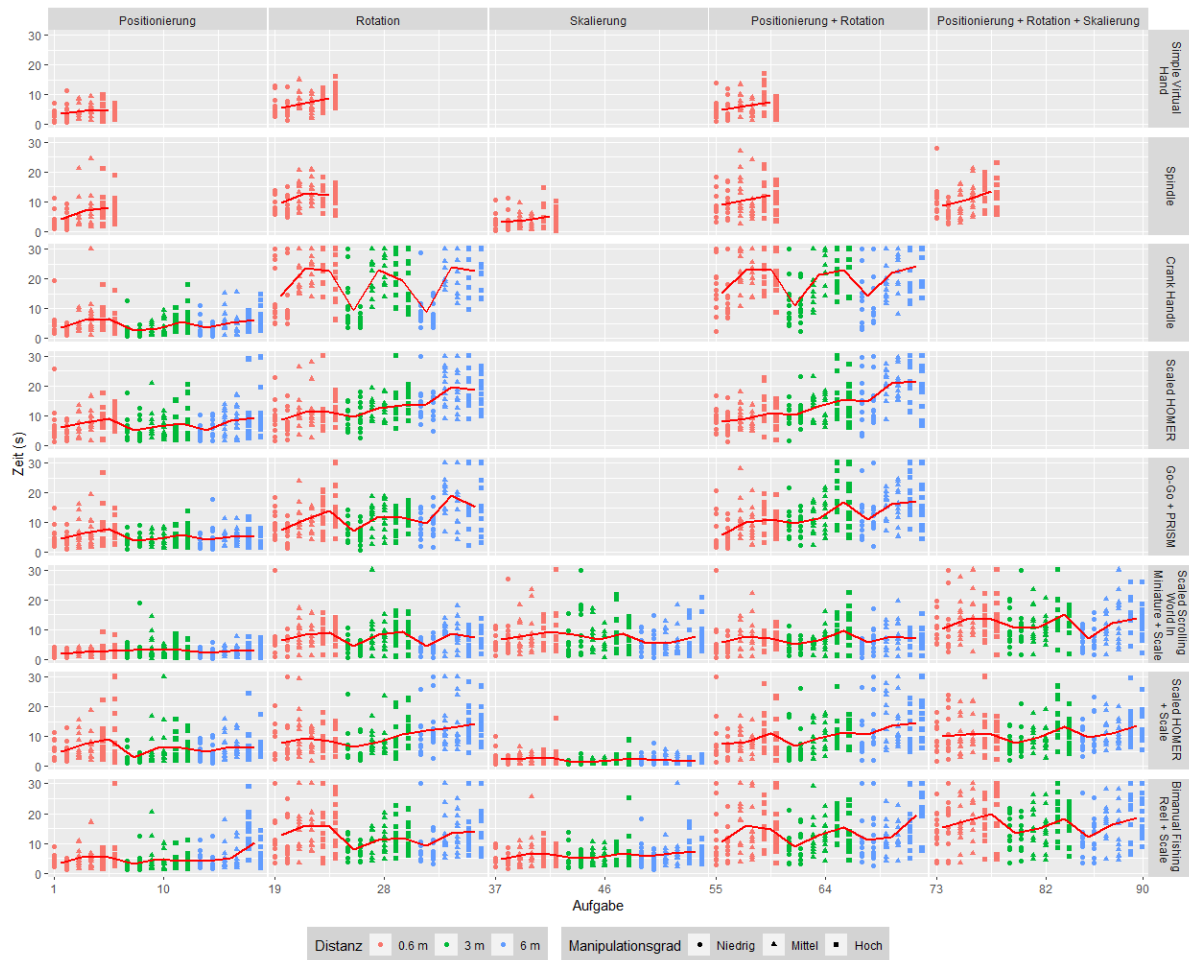
Distanz	Größe	Dichte	Scaled Scrolling World In Miniature + Scale		Scaled HOMER		Bimanual Fishing Reel + Scale		Head Based Selection		Go-Go + PRISM	
			ρ	p	ρ	p	ρ	p	ρ	p	ρ	p
0.6 m	10 cm	X	-	-	0,15	0,15	-0,07	0,54	-	-	0,04	0,67
0.6 m	15 cm	X	0,00	1,00	0,13	0,22	0,00	1,00	-	-	0,00	1,00
0.6 m	5 cm	X	-0,32	0,00	0,12	0,27	0,10	0,37	-	-	0,00	1,00
0.6 m	X	10 cm	0,00	1,00	-0,15	0,15	0,00	0,98	-	-	-0,01	0,93
0.6 m	X	Keine	-	-	-0,12	0,27	-0,24	0,02	-	-	0,00	1,00
0.6 m	X	5 cm	-0,36	0,00	-0,13	0,22	-0,13	0,21	-	-	0,00	1,00
3 m	10 cm	X	-0,23	0,03	0,07	0,51	0,13	0,21	-	-	0,00	1,00
3 m	15 cm	X	0,00	1,00	-0,12	0,26	0,12	0,25	-	-	0,09	0,43
3 m	5 cm	X	-0,19	0,08	0,16	0,13	0,23	0,03	-	-	-0,06	0,59
3 m	X	10 cm	-0,06	0,56	-0,28	0,01	-0,31	0,00	-	-	-0,09	0,42
3 m	X	Keine	-0,24	0,02	-0,33	0,00	-0,35	0,00	-	-	0,25	0,02
3 m	X	5 cm	-0,33	0,00	-0,08	0,44	-0,23	0,03	-	-	0,11	0,30
6 m	10 cm	X	0,08	0,48	0,02	0,83	0,16	0,13	-	-	0,03	0,80
6 m	15 cm	X	0,05	0,63	0,02	0,83	0,03	0,79	0,00	1,00	0,14	0,20
6 m	5 cm	X	-0,23	0,03	-0,07	0,54	0,08	0,46	-	-	-0,06	0,54
6 m	X	10 cm	-0,18	0,08	-0,43	0,00	-0,30	0,00	0,13	0,22	0,22	0,04
6 m	X	Keine	0,15	0,15	-0,49	0,00	-0,45	0,00	-	-	0,16	0,13
6 m	X	5 cm	-0,14	0,19	-0,51	0,00	-0,37	0,00	-	-	-0,04	0,69
X	10 cm	10 cm	0,00	1,00	0,43	0,00	0,41	0,00	-	-	0,14	0,19
X	10 cm	Keine	0,15	0,15	0,41	0,00	0,49	0,00	-	-	0,04	0,74
X	10 cm	5 cm	0,05	0,64	0,49	0,00	0,34	0,00	-	-	0,05	0,64
X	15 cm	10 cm	-0,15	0,15	0,27	0,01	0,44	0,00	0,13	0,22	0,33	0,00
X	15 cm	Keine	0,26	0,01	0,30	0,00	0,30	0,00	-	-	0,26	0,01
X	15 cm	5 cm	0,23	0,03	0,31	0,00	0,28	0,01	-	-	0,14	0,18
X	5 cm	10 cm	0,00	0,97	0,54	0,00	0,57	0,00	-	-	0,07	0,49
X	5 cm	Keine	0,06	0,58	0,57	0,00	0,53	0,00	-	-	0,14	0,20
X	5 cm	5 cm	-0,02	0,83	0,68	0,00	0,50	0,00	-	-	0,20	0,05

A.9.3 Manipulation

Die folgenden Streudiagramme sollen als eine visuelle Unterstützung zur Erkennung der Korrelationen in der Manipulationsstudie dienen. Diese werden für jede objektiv erfasste abhängige Variable (Durchführungszeit und Präzision bzgl. Position, Rotation und Skalierung) dargestellt. Dabei stellt jeder Punkt die benötigte Zeit bzw. die erreichte Präzision bei der Durchführung einer Aufgabe durch eine Testperson dar. Wie in A.9.2 ist auf der y-Achse die Zeit bzw. Präzision und auf der x-Achse die laufende Nummer der Aufgaben dargestellt. Die fünf Bereiche pro Technik teilen die Aufgaben in die entsprechenden Aufgabentypen ein. Die Farbe eines Datenpunktes beschreibt die Distanz zum Aufgabenobjekt und die Form des Datenpunktes gibt den Manipulationsgrad an. Die rote Linie setzt sich aus den Mittelwerten der Zeiten der verschiedenen Szenarien zusammen.

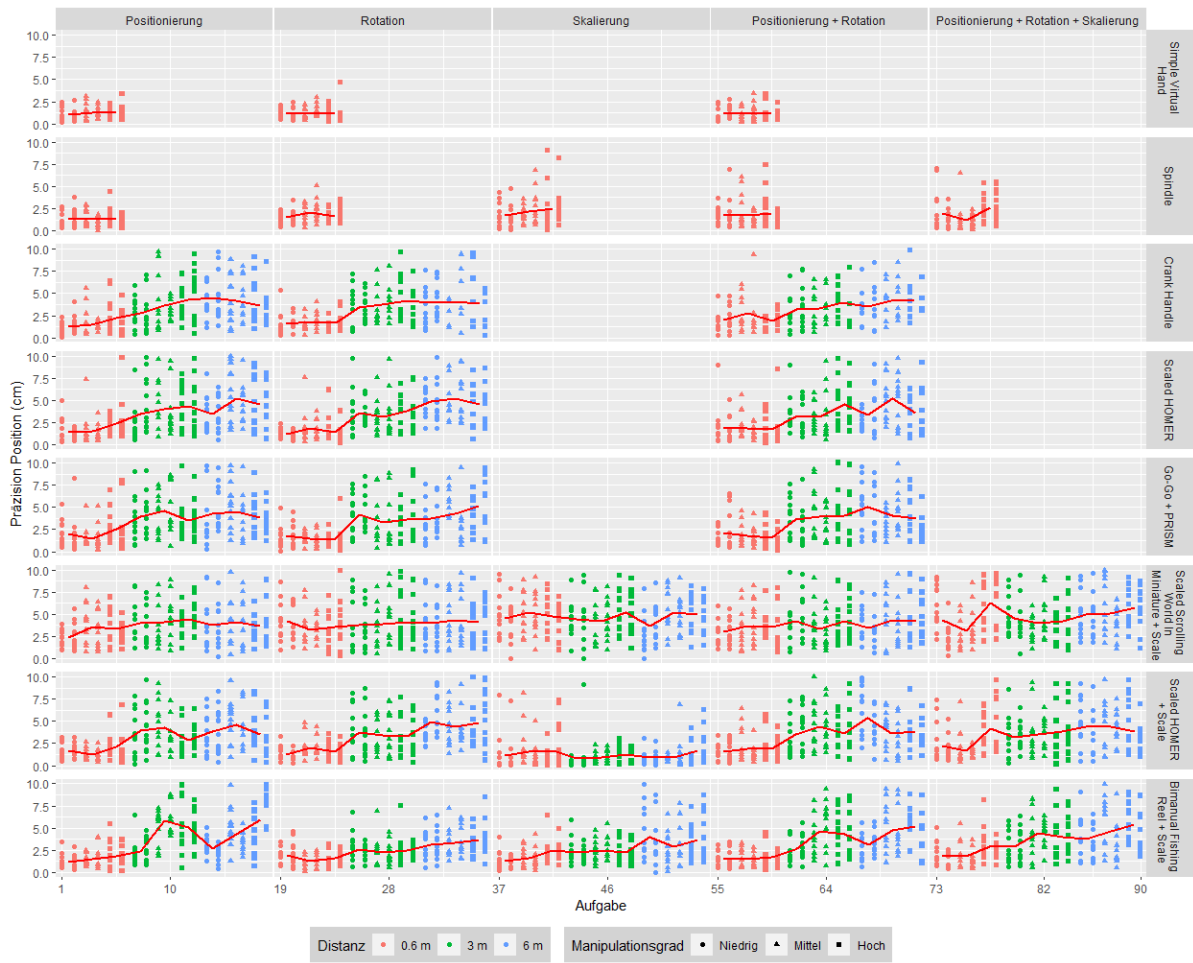
Auch die Korrelationskoeffizienten wurden detailliert bestimmt und sind in den Tabellen dargestellt. Diese sind nach Technik und Aufgabentyp gruppiert. Es wurde jeweils eine Ausprägung der Variablen Distanz oder Manipulationsgrad (MG) angenommen und die Korrelation zwischen der jeweils anderen unabhängigen Variablen und der entsprechenden abhängigen Variablen bestimmt. Sowohl in der Darstellung im Streudiagramm als auch bei der Bestimmung der Korrelationen wurden bei den Präzisionen ausschließlich die Ergebnisse der Aufgaben mit einbezogen, die erfolgreich beendet wurden.

Zeit



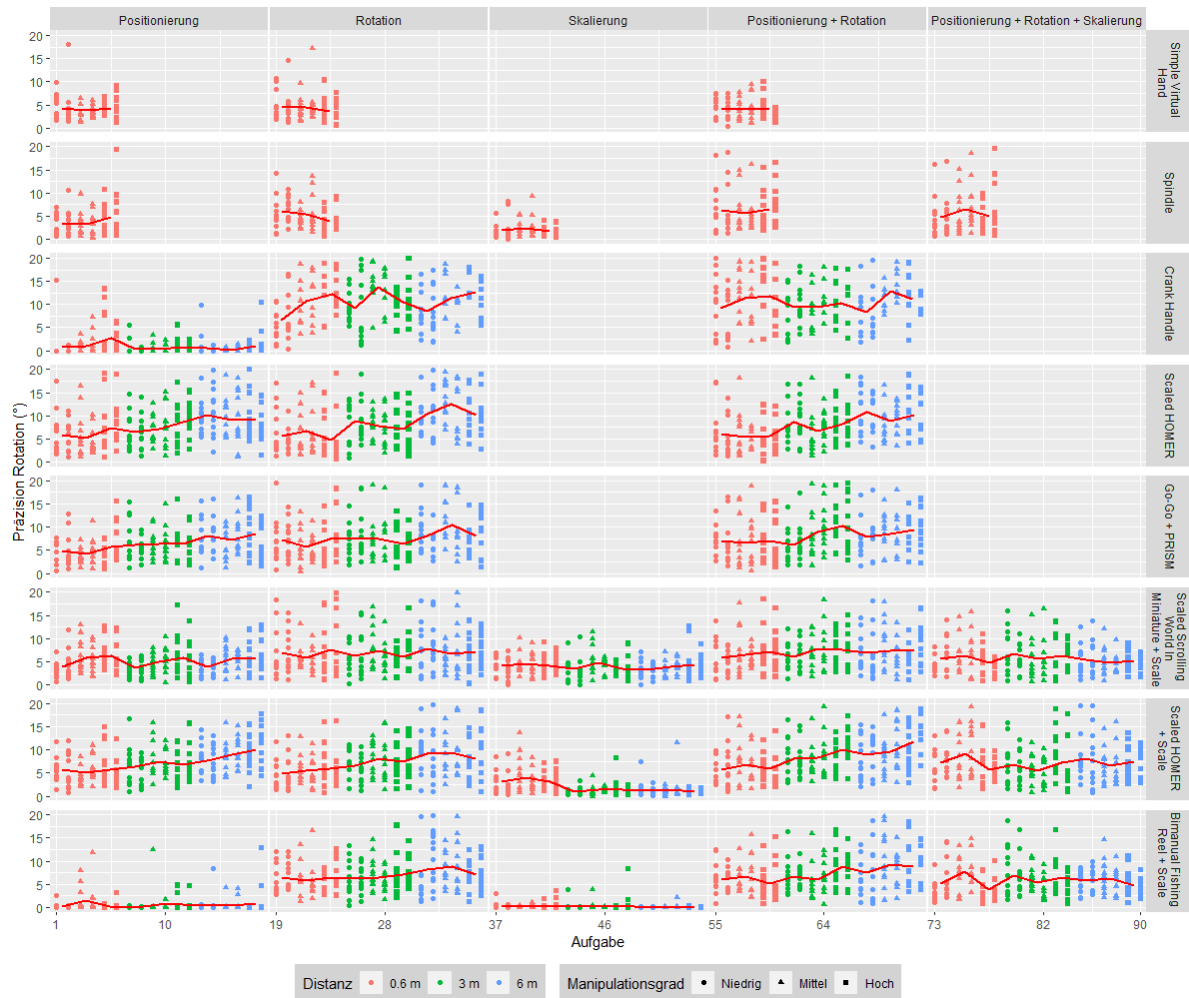
Distanz	MG	Typ	Simple Virtual Hand		Spindle		Crank Handle		Scaled HOMER		Go-Go + PRISM		Scaled Scrolling World In Miniature + Scale		Scaled HOMER + Scale		Bimanual Fishing Reel + Scale	
			ρ	p	ρ	p	ρ	p	ρ	p	ρ	p	ρ	p	ρ	p	ρ	p
0,6 m	X	P	0,21	0,07	0,42	0,00	0,45	0,00	0,39	0,00	0,28	0,02	0,31	0,01	0,31	0,01	0,20	0,09
0,6 m	X	R	0,39	0,00	0,29	0,01	0,37	0,00	0,23	0,05	0,45	0,00	0,35	0,00	0,21	0,08	0,15	0,20
0,6 m	X	P,R	0,30	0,01	0,24	0,04	0,42	0,00	0,24	0,05	0,44	0,00	0,30	0,01	0,26	0,03	0,27	0,02
0,6 m	X	S	-	-	0,27	0,02	-	-	-	-	-	-	0,20	0,09	0,17	0,16	0,22	0,07
0,6 m	X	P,R,S	-	-	0,42	0,00	-	-	-	-	-	-	0,28	0,02	0,10	0,38	0,26	0,03
3 m	X	P	-	-	-	-	0,48	0,00	0,19	0,10	0,27	0,02	0,04	0,76	0,40	0,00	0,20	0,09
3 m	X	R	-	-	-	-	0,48	0,00	0,32	0,01	0,41	0,00	0,45	0,00	0,38	0,00	0,34	0,00
3 m	X	P,R	-	-	-	-	0,57	0,00	0,35	0,00	0,40	0,00	0,49	0,00	0,46	0,00	0,47	0,00
3 m	X	S	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,10	0,38	0,29	0,01	0,19	0,12
3 m	X	P,R,S	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,33	0,01	0,40	0,00	0,30	0,01
6 m	X	P	-	-	-	-	0,41	0,00	0,30	0,01	0,19	0,10	0,16	0,17	0,10	0,40	0,43	0,00
6 m	X	R	-	-	-	-	0,61	0,00	0,31	0,01	0,28	0,02	0,36	0,00	0,19	0,10	0,33	0,01
6 m	X	P,R	-	-	-	-	0,45	0,00	0,37	0,00	0,39	0,00	0,20	0,10	0,26	0,03	0,42	0,00
6 m	X	S	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,14	0,25	-0,07	0,57	0,17	0,15
6 m	X	P,R,S	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,48	0,00	0,33	0,00	0,37	0,00
X	Niedrig	P	-	-	-	-	-0,03	0,83	-0,05	0,69	-0,06	0,61	0,04	0,77	0,02	0,89	0,03	0,77
X	Niedrig	R	-	-	-	-	-0,28	0,02	0,41	0,00	0,20	0,09	-0,23	0,05	0,34	0,00	-0,15	0,20
X	Niedrig	P,R	-	-	-	-	-0,10	0,40	0,43	0,00	0,40	0,00	0,14	0,24	0,22	0,06	0,05	0,65
X	Niedrig	S	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,06	0,59	0,05	0,66	0,05	0,71
X	Niedrig	P,R,S	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,19	0,12	-0,02	0,88	-0,22	0,07
X	Mittel	P	-	-	-	-	-0,04	0,72	0,06	0,64	-0,04	0,77	0,02	0,86	-0,02	0,85	-0,13	0,28
X	Mittel	R	-	-	-	-	0,06	0,64	0,53	0,00	0,45	0,00	0,03	0,81	0,27	0,02	-0,14	0,24
X	Mittel	P,R	-	-	-	-	-0,05	0,70	0,74	0,00	0,43	0,00	0,04	0,73	0,29	0,01	-0,17	0,17
X	Mittel	S	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,20	0,10	-0,14	0,25	0,06	0,59
X	Mittel	P,R,S	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,07	0,58	0,06	0,60	-0,04	0,71
X	Hoch	P	-	-	-	-	0,01	0,91	-0,09	0,44	-0,22	0,07	-0,02	0,84	-0,19	0,11	0,32	0,01
X	Hoch	R	-	-	-	-	0,00	0,98	0,52	0,00	0,02	0,85	-0,19	0,12	0,39	0,00	-0,09	0,47
X	Hoch	P,R	-	-	-	-	0,04	0,73	0,56	0,00	0,36	0,00	0,04	0,76	0,22	0,06	-0,25	0,03
X	Hoch	S	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,10	0,42	-0,18	0,14	0,04	0,72
X	Hoch	P,R,S	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,03	0,82	0,22	0,06	-0,08	0,50

Präzision Position



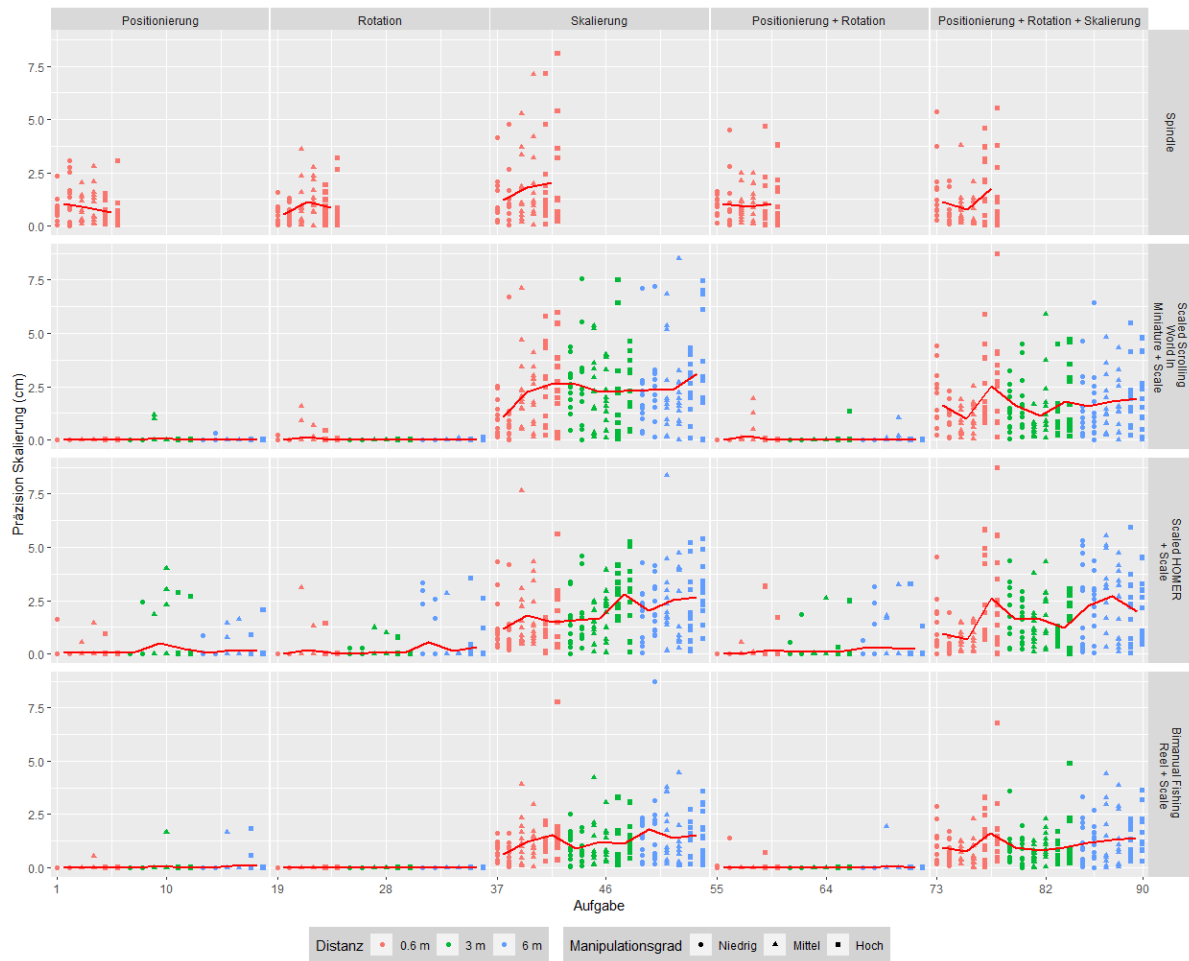
Distanz	MG	Typ	Simple Virtual Hand		Spindle		Crank Handle		Scaled HOMER		Go-Go + PRISM		Scaled Scrolling World In Miniature + Scale		Scaled HOMER + Scale		Bimanual Fishing Reel + Scale	
			ρ	p	ρ	p	ρ	p	ρ	p	ρ	p	ρ	p	ρ	p	ρ	p
0,6 m	X	P	0,17	0,16	-0,02	0,85	0,24	0,04	0,33	0,00	0,06	0,62	0,20	0,09	0,06	0,61	0,20	0,10
0,6 m	X	R	-0,10	0,41	0,07	0,53	0,07	0,64	-0,06	0,65	-0,15	0,22	-0,13	0,30	0,14	0,24	-0,04	0,76
0,6 m	X	P,R	-0,07	0,58	0,07	0,58	0,01	0,94	0,00	0,97	-0,09	0,46	0,10	0,41	0,02	0,90	0,05	0,68
0,6 m	X	S	-	-	0,11	0,34	-	-	-	-	-	-	0,08	0,52	0,16	0,19	0,48	0,00
0,6 m	X	P,R,S	-	-	0,21	0,08	-	-	-	-	-	-	0,28	0,02	0,35	0,00	0,27	0,03
3 m	X	P	-	-	-	-	0,28	0,02	0,19	0,11	-0,06	0,61	0,11	0,34	-0,17	0,15	0,44	0,00
3 m	X	R	-	-	-	-	0,13	0,34	0,04	0,73	-0,13	0,27	0,05	0,68	-0,05	0,67	-0,05	0,68
3 m	X	P,R	-	-	-	-	0,17	0,23	0,26	0,03	0,06	0,64	-0,03	0,81	0,04	0,72	0,28	0,02
3 m	X	S	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,13	0,28	0,34	0,00	0,02	0,85
3 m	X	P,R,S	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,04	0,75	0,03	0,80	0,19	0,10
6 m	X	P	-	-	-	-	-0,19	0,12	0,15	0,22	-0,02	0,89	0,01	0,92	-0,04	0,72	0,54	0,00
6 m	X	R	-	-	-	-	-0,07	0,60	-0,08	0,51	0,24	0,05	0,00	0,98	-0,08	0,50	0,11	0,37
6 m	X	P,R	-	-	-	-	0,15	0,30	0,04	0,76	-0,19	0,11	0,10	0,39	-0,23	0,06	0,38	0,00
6 m	X	S	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,27	0,02	0,16	0,17	-0,07	0,58
6 m	X	P,R,S	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,14	0,23	-0,08	0,48	0,26	0,03
X	Niedrig	P	-	-	-	-	0,64	0,00	0,49	0,00	0,42	0,00	0,25	0,04	0,40	0,00	0,54	0,00
X	Niedrig	R	-	-	-	-	0,47	0,00	0,75	0,00	0,42	0,00	-0,05	0,70	0,69	0,00	0,34	0,00
X	Niedrig	P,R	-	-	-	-	0,30	0,02	0,43	0,00	0,49	0,00	0,09	0,43	0,60	0,00	0,45	0,00
X	Niedrig	S	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,16	0,19	0,25	0,04	0,60	0,00
X	Niedrig	P,R,S	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,12	0,33	0,36	0,00	0,39	0,00
X	Mittel	P	-	-	-	-	0,51	0,00	0,64	0,00	0,52	0,00	0,09	0,44	0,62	0,00	0,51	0,00
X	Mittel	R	-	-	-	-	0,47	0,00	0,65	0,00	0,49	0,00	0,13	0,29	0,50	0,00	0,57	0,00
X	Mittel	P,R	-	-	-	-	0,32	0,02	0,56	0,00	0,50	0,00	0,12	0,32	0,36	0,00	0,54	0,00
X	Mittel	S	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,02	0,88	-0,16	0,19	0,30	0,01
X	Mittel	P,R,S	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,33	0,00	0,54	0,00	0,45	0,00
X	Hoch	P	-	-	-	-	0,26	0,03	0,38	0,00	0,36	0,00	0,05	0,68	0,34	0,00	0,60	0,00
X	Hoch	R	-	-	-	-	0,35	0,02	0,60	0,00	0,64	0,00	0,07	0,58	0,58	0,00	0,59	0,00
X	Hoch	P,R	-	-	-	-	0,54	0,00	0,39	0,00	0,48	0,00	0,11	0,37	0,46	0,00	0,59	0,00
X	Hoch	S	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,04	0,74	0,14	0,26	0,17	0,16
X	Hoch	P,R,S	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,08	0,52	-0,02	0,86	0,46	0,00

Präzision Rotation



Distanz	MG	Typ	Simple Virtual Hand		Spindle		Crank Handle		Scaled HOMER		Go-Go + PRISM		Scaled Scrolling World In Miniature + Scale		Scaled HOMER + Scale		Bimanual Fishing Reel + Scale	
			ρ	p	ρ	p	ρ	p	ρ	p	ρ	p	ρ	p	ρ	p	ρ	p
0,6 m	X	P	0,11	0,34	0,09	0,46	0,46	0,00	0,15	0,20	0,10	0,38	0,34	0,00	-0,04	0,74	-0,06	0,59
0,6 m	X	R	-0,11	0,34	-0,31	0,01	0,46	0,00	-0,18	0,14	-0,05	0,70	-0,02	0,89	0,12	0,32	0,05	0,70
0,6 m	X	P,R	-0,07	0,55	0,09	0,45	0,19	0,16	0,00	0,98	-0,04	0,71	0,11	0,37	0,03	0,81	-0,17	0,18
0,6 m	X	S	-	-	0,08	0,51	-	-	-	-	-	-	-0,02	0,87	0,04	0,74	0,23	0,05
0,6 m	X	P,R,S	-	-	0,03	0,82	-	-	-	-	-	-	-0,07	0,57	-0,14	0,23	-0,09	0,45
3 m	X	P	-	-	-	-	0,25	0,04	0,21	0,08	0,08	0,53	0,26	0,03	0,03	0,78	0,20	0,09
3 m	X	R	-	-	-	-	0,09	0,50	-0,16	0,17	-0,09	0,46	-0,02	0,84	0,08	0,49	0,08	0,53
3 m	X	P,R	-	-	-	-	0,06	0,65	-0,04	0,75	0,34	0,00	0,16	0,17	0,23	0,05	0,25	0,04
3 m	X	S	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,01	0,91	0,13	0,29	0,01	0,92
3 m	X	P,R,S	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,06	0,65	-0,02	0,89	0,02	0,84
6 m	X	P	-	-	-	-	0,31	0,01	-0,10	0,39	0,03	0,80	0,26	0,03	0,24	0,04	-0,04	0,75
6 m	X	R	-	-	-	-	0,39	0,01	-0,03	0,81	-0,01	0,94	-0,01	0,95	-0,08	0,53	-0,03	0,83
6 m	X	P,R	-	-	-	-	0,33	0,02	-0,08	0,50	0,15	0,21	0,07	0,56	0,23	0,06	0,11	0,39
6 m	X	S	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,11	0,36	-0,04	0,76	0,05	0,67
6 m	X	P,R,S	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,05	0,69	0,00	0,98	-0,18	0,13
X	Niedrig	P	-	-	-	-	0,09	0,46	0,39	0,00	0,37	0,00	0,08	0,53	0,22	0,06	-0,17	0,16
X	Niedrig	R	-	-	-	-	0,16	0,18	0,43	0,00	0,13	0,29	0,10	0,39	0,38	0,00	0,04	0,73
X	Niedrig	P,R	-	-	-	-	-0,06	0,64	0,45	0,00	0,13	0,28	0,06	0,61	0,32	0,01	0,11	0,37
X	Niedrig	S	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,15	0,22	-0,44	0,00	-0,18	0,14
X	Niedrig	P,R,S	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,04	0,72	0,04	0,74	0,19	0,12
X	Mittel	P	-	-	-	-	-0,12	0,34	0,38	0,00	0,36	0,00	0,00	1,00	0,51	0,00	-0,32	0,01
X	Mittel	R	-	-	-	-	0,05	0,75	0,45	0,00	0,40	0,00	0,01	0,94	0,37	0,00	0,27	0,02
X	Mittel	P,R	-	-	-	-	0,12	0,41	0,42	0,00	0,22	0,06	0,08	0,50	0,26	0,03	0,21	0,08
X	Mittel	S	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,09	0,43	-0,49	0,00	-0,25	0,03
X	Mittel	P,R,S	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,13	0,27	-0,21	0,08	-0,16	0,18
X	Hoch	P	-	-	-	-	-0,17	0,15	0,20	0,10	0,26	0,03	-0,04	0,73	0,44	0,00	-0,11	0,35
X	Hoch	R	-	-	-	-	0,04	0,78	0,48	0,00	0,11	0,36	0,11	0,35	0,23	0,06	0,05	0,67
X	Hoch	P,R	-	-	-	-	-0,04	0,79	0,44	0,00	0,23	0,05	0,01	0,92	0,00	0,39	0,00	0,00
X	Hoch	S	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,06	0,64	-0,55	0,00	-0,38	0,00
X	Hoch	P,R,S	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,06	0,63	0,19	0,11	0,15	0,22

Präzision Skalierung



Distanz	MG	Typ	Simple Virtual Hand		Spindle		Crank Handle		Scaled HOMER		Go-Go + PRISM		Scaled Scrolling World In Miniature + Scale		Scaled HOMER + Scale		Bimanual Fishing Reel + Scale	
			ρ	p	ρ	p	ρ	p	ρ	p	ρ	p	ρ	p	ρ	p	ρ	p
0,6 m	X	P	-	-	-0,23	0,06	-	-	-	-	-	-	0,09	0,48	0,00	1,00	0,00	0,98
0,6 m	X	R	-	-	0,14	0,26	-	-	-	-	-	-	-0,05	0,68	0,08	0,50	-	-
0,6 m	X	P,R	-	-	-0,07	0,58	-	-	-	-	-	-	-0,01	0,96	0,15	0,21	-0,09	0,48
0,6 m	X	S	-	-	0,14	0,23	-	-	-	-	-	-	0,39	0,00	0,21	0,07	0,42	0,00
0,6 m	X	P,R,S	-	-	0,13	0,27	-	-	-	-	-	-	0,18	0,15	0,40	0,00	0,21	0,08
3 m	X	P	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00	1,00	0,06	0,62	0,00	1,00
3 m	X	R	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,06	0,61	-	-
3 m	X	P,R	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,21	0,08	0,00	1,00	-	-
3 m	X	S	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,11	0,35	0,38	0,00	0,08	0,48
3 m	X	P,R,S	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00	0,99	-0,14	0,23	-0,09	0,46
6 m	X	P	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,15	0,22	0,01	0,93	0,17	0,15
6 m	X	R	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00	0,98	-0,02	0,87	-	-
6 m	X	P,R	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,07	0,55	-0,09	0,48	0,01	0,93
6 m	X	S	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,17	0,16	0,16	0,17	-0,05	0,71
6 m	X	P,R,S	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,13	0,28	-0,04	0,73	0,10	0,40
X	Niedrig	P	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,15	0,22	0,07	0,56	-	-
X	Niedrig	R	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,16	0,20	0,30	0,01	-	-
X	Niedrig	P,R	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00	1,00	0,26	0,03	-0,21	0,08
X	Niedrig	S	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,38	0,00	0,34	0,00	0,42	0,00
X	Niedrig	P,R,S	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,09	0,44	0,34	0,00	0,10	0,42
X	Mittel	P	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,14	0,23	0,05	0,67	0,00	0,98
X	Mittel	R	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,21	0,08	0,00	0,98	-	-
X	Mittel	P,R	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,16	0,18	0,07	0,53	0,15	0,23
X	Mittel	S	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,04	0,73	0,20	0,09	-0,02	0,85
X	Mittel	P,R,S	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,21	0,08	0,52	0,00	0,10	0,43
X	Hoch	P	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,15	0,22	0,06	0,62	0,21	0,08
X	Hoch	R	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,09	0,48	0,23	0,05	-	-
X	Hoch	P,R	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,09	0,48	0,02	0,89	-0,15	0,23
X	Hoch	S	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,07	0,54	0,32	0,01	0,06	0,61
X	Hoch	P,R,S	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,10	0,40	-0,07	0,54	0,00	0,97