

FluidHaptics

Taktiler Feedback für Greif-Interaktionen in Mixed-Reality
Anwendungen

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades
Master of Science (M.Sc.)

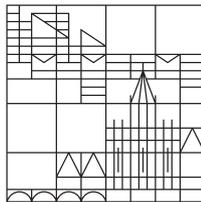
vorgelegt von

Alexander Schönhals

am 13. Januar 2017

an der

Universität
Konstanz



Fachbereich für Informatik und Informationswissenschaft
Lehrstuhl für Mensch-Computer-Interaktion

Gutachter

Prof. Dr. Harald Reiterer

Prof. Dr. Bela Gipp

Betreuer

Daniel Klinkhammer

Konstanz, 2017

ABSTRACT

This work introduces the development and implementation of a system that provides tactile feedback within virtual or augmented reality applications. The specific focus is on the realization of a tactile stimulus, which supports users in grasp interaction in virtual environments.

Besides the necessary foundation with regard to the anatomy of the human hand and the grip taxonomies, different technologies for simulating haptic and tactile stimuli were taken into consideration. In addition, an overview of existing work in the literature, that realize or introduce approaches for identified needs is provided. Also, related systems are verified against predefined requirements. Based on this preliminary work an iteratively designed prototype is presented, followed by a description conducted user study.

Finally, the fulfillment of the requirements is reviewed and an outlook for future work is described.

ZUSAMMENFASSUNG

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Konzeption und Umsetzung eines Systems, das ein taktiles Feedback innerhalb von virtueller oder erweiterter Realität ermöglicht. Der besondere Fokus liegt dabei auf der Realisierung eines taktilen Reizes, der Benutzer beim Greifen von virtuellen Objekten unterstützt.

Neben den notwendigen Grundlagen im Bezug auf die Anatomie der menschlichen Hand und der Greiftaxonomien, werden in dieser Arbeit zunächst unterschiedliche Technologien zur Simulation von haptischen und taktilen Reizen erläutert. Anschließend werden mit Hilfe der Literatur existierende Arbeiten vorgestellt, die Ansätze zu den zuvor definierten Anforderungen vorstellen oder bereits realisieren. Basierend auf den verwandten Arbeiten wird ein Versuchsaufbau vorgestellt, der daraufhin in einer Nutzerstudie evaluiert wird.

Zuletzt wird die Erfüllung der Anforderungen überprüft und ein Ausblick für den weiteren Forschungsbedarf beschrieben.

Geplante Einreichung zur Veröffentlichung

Die Veröffentlichung von Teilen dieser Arbeit ist auf der Konferenz

The 30th ACM User Interface Software and Technology Symposium

unter folgendem Titel geplant:

Schoenhals, A., Klinkhammer, D. und Reiterer, H. *FluidHaptics: Finger Force Sensing in Virtual Reality by Fluid Transition.*

„Wer hohe Türme bauen will, muss lange beim Fundament verweilen.“

— Anton Bruckner

DANKSAGUNG

Ich möchte mich recht herzlich bei allen bedanken, die mich bei der Entwicklung dieser Masterarbeit unterstützt haben. Zuerst gilt mein Dank meinem Betreuer Daniel Klinkhammer, der mit konstruktivem Feedback und kritischen Fragen zur Verbesserung und Weiterentwicklung dieser Arbeit beigetragen hat. Besonders erwähnen möchte ich, dass die ersten Diskussionen über mögliche Themen für diese Arbeit bereits im Frühjahr 2015 begonnen haben. Daher danke ich für die langjährige und ständige Unterstützung seitdem.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei Prof. Dr. Harald Reiterer und Jun.-Prof. Dr. Bela Gipp für ihre Zeit und für die wichtigen Diskussionen, die wir hatten. Ich möchte mich für die Möglichkeit bedanken, an vielen wissenschaftlichen Projekten während meines Masterstudiums mitgearbeitet zu haben. Ich schätze diese frühe Integration in die wissenschaftliche Arbeit, da diese Unterstützung und Hilfe für meine persönliche und wissenschaftliche Entwicklung sehr fördernd war.

Ganz besonders möchte ich mich bei Maximilian Weidele bedanken, der mich tatkräftig bei der Konstruktion des Prototypen unterstützt hat.

Ich danke Thomas Hepp und Felix Hamborg für die offenen und inspirierenden Diskussionen, die wir jeden Mittwoch in unserem Literaturclub hatten.

Zu guter Letzt, möchte ich meiner Familie, ganz besonders meinen Eltern Waldemar und Valentina Schönhals, meinen Freunden und meiner wunderbaren Freundin Marie Luise Claus danken, weil sie mich in allen meinen Bemühungen unterstützt haben. Vielen Dank!

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG	1
1.1	Motivation	1
1.2	Strukturierung dieser Arbeit	3
I	HAPTIK IN DER VIRTUELLEN WELT	5
2	THEORETISCHE GRUNDLAGEN	7
2.1	Physiologie der Hand	7
2.2	Technologien des haptischen Feedbacks	17
2.3	Mixed Reality	20
2.4	Elektro- und Magnetorheologische Flüssigkeiten	21
2.5	Anforderungen	23
3	VERWANDTE ARBEITEN	27
3.1	Überblick verwandter Arbeiten	28
3.2	Analyse ausgewählter Systeme	32
3.3	Zusammenfassung	45
II	FLUIDHAPTICS	49
4	SYSTEM UND ANWENDUNG	51
4.1	FluidHaptics Fingerkuppe	51
4.2	Anwendungssystem	58
5	EVALUATION	63
5.1	Forschungsfrage & Hypothesen	63
5.2	Studiendesign	64
5.3	Methoden zur Erhebung der Daten	70
5.4	Ablauf der Studie	71
5.5	Ergebnisse	72
5.6	Diskussion	80
5.7	Limitationen	83
6	SCHLUSSFOLGERUNG UND AUSBLICK	85
6.1	Schlussfolgerung	85
6.2	Ausblick	87
	LITERATUR	89
III	ANHANG	95
A	STUDIENUNTERLAGEN	97
B	TECHNISCHE DOKUMENTE	103

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1	Anatomie der menschlichen Hand	8
Abbildung 2	Studienergebnis zu Greifphasen	11
Abbildung 3	Taxonomie nach Cutkosky	13
Abbildung 4	Taxonomie nach Feix	14
Abbildung 5	Physiologie der menschlichen Haut	15
Abbildung 6	Objekteigenschaften beim Explorieren	17
Abbildung 7	Mixed Reality Definition	20
Abbildung 8	Viskosität von Magnetorheologischer Flüssigkeit	22
Abbildung 9	Anforderungen an das System	23
Abbildung 10	Geomagic Touch	28
Abbildung 11	Cybergrasp	29
Abbildung 12	Memica	32
Abbildung 13	Memica Glove	33
Abbildung 14	Architektur der Haptic Black Box	34
Abbildung 15	MudPad: Tactile Feedback and Haptic Texture Overlay for Touch Surfaces	35
Abbildung 16	MRF Zustands Schemata für MudPad	36
Abbildung 17	AIREAL Generator	37
Abbildung 18	AIREAL in Aktion	37
Abbildung 19	AIREAL Demo-Anwendung	39
Abbildung 20	UltraHaptics System	40
Abbildung 21	UltraHaptics Pinch-to-Zoom Geste	41
Abbildung 22	GloveOne Handschuhe	43
Abbildung 23	NormalTouch	44
Abbildung 24	TextureTouch	45
Abbildung 25	Mischung aus Eisenpulver und Öl	51
Abbildung 26	FluidHaptics Prototypen	53
Abbildung 27	FluidHaptics Fingerkuppe Skizze	54
Abbildung 28	FluidHaptics Fingerkuppe Seitenansicht	54
Abbildung 29	FluidHaptics Fingerkuppe Einzelteile	55
Abbildung 30	FluidHaptics Funktionalität	55
Abbildung 31	FluidHaptics Steuerungseinheit	56
Abbildung 32	Verteilung der Druckstärke auf Datenworte	58
Abbildung 33	Systemarchitektur	59
Abbildung 34	Dynamischer Druck	60
Abbildung 35	Motive OptiTrack Setting	61
Abbildung 36	FluidHaptics Handschuh	65
Abbildung 37	Studiensetting	66
Abbildung 38	Unterschiedliche Druckintensitäten	67
Abbildung 39	VR Szene Targeting Aufgabe	68

Abbildung 40	VR Szene Tracing Aufgabe	69
Abbildung 41	Ablauf der Studie	72
Abbildung 42	Unterscheidung Druckintensitäten	73
Abbildung 43	Unterscheidung nach Geschlecht	74
Abbildung 44	Zuordnung Druckverläufe	75
Abbildung 45	Zuordnung nach Geschlecht	75
Abbildung 46	Vibrationspräferenz	75
Abbildung 47	Fehlerdistanz bei Targeting I	76
Abbildung 48	Fehlerdistanz bei Targeting II)	77
Abbildung 49	Ausführungsdauer bei Targeting	77
Abbildung 50	Fehlerdistanz bei Tracing I	78
Abbildung 51	Fehlerdistanz bei Tracing II	79
Abbildung 52	Ausführungsdauer bei Tracing	79
Abbildung 53	UEQ Benchmark	80
Abbildung 54	UEQ Auswertung	81

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1	Schwellenwerte taktiler Reize	16
Tabelle 2	Gegenüberstellung von MRF und ERF	22
Tabelle 3	Technischer Vergleich ausgewählter Arbeiten	46
Tabelle 4	Gegenüberstellung Wahrnehmung Objekteigenschaften	47
Tabelle 5	Gegenüberstellung Anforderungen	48
Tabelle 6	FluidHaptics Technische Eigenschaften	56
Tabelle 7	Pinzuordnung FluidHaptics Steuereinheit	57
Tabelle 8	Kodierung der Datenworte/Druckstärke	57
Tabelle 9	Gegenüberstellung Anforderungen	86

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AR	Augmented Reality / Erweiterte Realität
CAD	Computer-aided design / rechnerunterstütztes Konstruieren
CES	Consumer Electronics Show Messe
DoF	Degree-of-freedom / Freiheitsgrad
ECS	Electrically Controlled Stiffness / elektronisch gesteuerte Festigkeit
EMS	Electrical muscle stimulation / elektronische Muskelstimulation
ERF	Elektrorheologische Flüssigkeit
HMD	Head-mounted Display
IR	Infrarotstrahlung
JND	Just noticeable difference / differentielle Wahrnehmbarkeitsschwelle
MR	Mixed Reality / Vermischte Realität bzw. Gemischte Realität
MRF	Magnetorheologische Flüssigkeit
PWM	Pulsweitenmodulation
SDK	Software Development Kit
TEI	Tangible, Embedded and Embodied Interaction Konferenz
TTL	Transistor-Transistor-Logik
TUI	Tangible User Interface / anfassbare Benutzerschnittstelle
UDP	User Datagram Protocol
VR	Virtual Reality / Virtuelle Realität

Realistisch und immersiv, sollen Anwendungen innerhalb der virtuellen Realität sein. Diese Hauptziele werden mit Hilfe von sogenannten Head-Mounted Displays (HMD) nun bereits seit fast 50 Jahren verfolgt [58]. Hauptsächlich wird die Immersion durch visuelle oder auditive Reize erreicht. Die Wissenschaft strebt jedoch nach multimodaler Interaktion, die möglichst alle Sinne des Menschen bedient. Die meisten Publikationen sind derzeit der Meinung, dass simulierte Haptik als wesentlicher Faktor für steigende Immersion an nächster Stelle steht [7, 21, 56].

Diese Masterthesis beschäftigt sich mit der Konzeption und Umsetzung eines neuartigen Ansatzes zur Generierung von taktilen Reizen innerhalb von VR oder AR Anwendungen. Maßgeblich soll mit diesem Ansatz das Greifen von virtuellen Objekten ermöglicht und durch realitätsnahe Haptik veredelt werden. Hierzu werden anatomische Grundlagen und technologische Ansätze betrachtet.

De facto wird taktiler Feedback hauptsächlich durch Vibration [4] in Handschuhen [17, 33], klobigen Exoskelett-Aufbauten [26, 60] oder mit Hilfe stationäre Roboterarme [36, 40] ausgelöst.

FluidHaptics möchte einen fließenden Druck erzeugen, der unter anderem durch Einsatz von intelligenten Flüssigkeiten zustande kommt und dem realen Fingerdruck am nächsten ist.

Den Leser erwartet die Beschreibung der iterativen Entwicklungsphase, die Umsetzung der physischen Bauteile sowie die Realisierung der Software, die für die taktilen Reize verantwortlich sein wird.

1.1 MOTIVATION

Seit über einem Jahrhundert wird das menschliche Greifen intensiv erforscht. Denn nicht zuletzt ist die Fähigkeit des Greifens eine der wichtigsten Eigenschaften unserer Spezies. Sie ermöglicht es uns Dinge zu modellieren, diese zu manipulieren oder aber auch die Position eines Objekts zu verändern. Es ist naheliegend, dass die Erforschung der menschlichen Greifbewegung allen voran der Kognitionspsychologie zuzuschreiben ist. Jedoch wurde in der Vergangenheit auch in der Robotik bzw. Medizin, hauptsächlich für die Prothesenherstellung, diese Fähigkeit beleuchtet. Erst in den letzten Jahren hat man angefangen auch in der Disziplin Mensch-Computer Interaktion dieses Thema unter die Lupe zu nehmen.

Das Greifen als solches ist neben der Sprache wohl die ausschlaggebende Fähigkeit, die uns von anderen Lebewesen unterscheidet.

Nicht zuletzt ist diese Eigenschaft verantwortlich für einige der wichtigsten Meilensteine der menschlichen Evolution, sei es das Feuer machen, Räder schnitzen, Geschichten aufschreiben oder auch Anwendungen am Computer programmieren. All diese Fortschritte sind nur durch den gewachsenen Daumen an unseren Händen ermöglicht worden, mit denen wir in unserer Umgebung Objekte greifen und diese dann benutzen und manipulieren konnten.

Während zu Urzeiten die Menschen grundlegende Herausforderungen hatten und Instrumente schufen um physiologische Bedürfnisse zu stillen, so entwickelten sich durch den technologischen Fortschritt nicht nur neue Bedürfnisse, sondern auch neue Werkzeuge. Im Informationszeitalter und der einhergehenden Digitalisierung wurden zur Exploration von digitalen Informationen Werkzeuge entwickelt, die dem Menschen die Manipulation dieser grundsätzlich nicht fassbaren Informationen ermöglichen - Tastaturen, Mäuse, digitale Stifte.

Um eine Vertrautheit mit dem Computer zu schaffen, werden beispielsweise Tangible User Interfaces entwickelt (TUI) [11, 24]. Bei TUIs handelt es sich um physische Objekte, die der interagierenden Person meist aus dem realen Umfeld aufgrund ihrer Formgebung bekannt sind. Diese Objekte werden mit digitalen Funktionen gekoppelt. Beispielsweise können durch Auflegen eines physischen Gegenstandes auf einen berührungsempfindlichen Tisch Informationen aufgerufen und mittels Touch-Interaktion exploriert werden. Insbesondere im musealen Kontext konnte festgestellt werden, dass vor allem in Bezug auf nicht computeraffine Benutzer diese Technologie ein großes Potenzial darstellt. „Jeder Mensch ist seit seiner Kindheit mit der Manipulation von physischen Gegenständen vertraut. Dieses Vorwissen aus der Realwelt machen sich TUIs zu Nutze. Die Bedienung muss nicht erst erlernt werden, sondern die Benutzungsschnittstelle ist direkt in die physische Umgebung eingebettet und erlaubt eine vertraute Interaktion aus dieser.“[31]. Diese Objekte, auch Tangibles oder Tokens genannt, haben das Ziel die Interaktion zwischen Mensch und Computer effizienter und intuitiver zu machen und letztlich digitale Informationen fassbar bzw. greifbar zu machen.

Durch das Aufkommen von Virtual Reality (VR) und Augmented Reality (AR), zusammengefasst im Sammelbegriff Mixed Reality (MR), bietet die MR-Technologie eine bisher nicht dagewesene Immersion in die digitale Welt. Dieses Gefühl des vollkommenen Eintauchens in die virtuelle Welt beschränkt sich jedoch weitestgehend auf die visuellen und auditiven Faktoren. Das Manipulieren bzw. Benutzen von virtuellen Gegenständen in der virtuellen Welt wird aktuell durch die Eingabe mit Hilfe von Controllern¹ bewerkstelligt. Einer natürlich wirkenden Interaktion mit einem Gegenstand steht dieser Controller dann doch meist im Weg. Der Einsatz von Gestenerken-

¹ <https://www.htcvive.com/de/product/> aufgerufen am 23.06.2016

nungsalgorithmen durch das abgreifen der Daten aus verbauten Sensoren innerhalb eines Handschuhs, oder aber auch durch den Einsatz von externen Infrarot-Kamera-Systemen, wie beispielsweise der Leap-Motion² lässt die Hürde des Controllers verschwinden. Da aber die Greifbewegung eine bi-direktionale Beziehung zwischen dem Objekt und der interagierenden Person darstellt, fehlt es an haptischen bzw. taktilen Reizen.

Das Projekt GloveOneVR³, welches als Kickstarter-Projekt erfolgreich durch begeisterte Unterstützer finanziert wurde, verfolgt eben diesen Ansatz. Es handelt sich um einen Handschuh, der durch Vibrationsmotoren, positioniert an den Fingerkuppen, ein haptisches Feedback liefert. Vibrierende Datenhandschuhe wurden in der Vergangenheit bereits diverse vorgestellt, doch dieser hat den Fokus hauptsächlich auf VR-Anwendungen und bietet darüber hinaus eine SDK an um eigene VR-Anwendungen an ihr System anzubinden.

Der menschliche Tastsinn lässt sich grob auf drei physikalische Reize unterteilen - Vibration, Temperatur und Druck. Es müssen folglich, neben der Vibration, weitere Ansätze erforscht werden, wie man einen natürlich wahrgenommenen Druck erzeugen kann, um dem Benutzer einer MR-Anwendung eine intuitive Interaktion, sowie neuartige Anwendungsmöglichkeiten zu gewährleisten.

1.2 STRUKTURIERUNG DIESER ARBEIT

Folgend wird die Gliederung dieser Masterarbeit erläutert. Im [Kapitel 2](#) wird das Fundament für die Arbeit beschrieben. Neben der physiologischen Themen der Haptik, werden auch technologische Ansätze zur Erzeugung von haptischen Feedback thematisiert. Ebenfalls in diesem Kapitel werden basierend auf den theoretischen Grundlagen, Anforderungen für die praktische Umsetzung von FluidHaptics definiert. [Kapitel 3](#) stellt eine Reihe an verwandten Arbeiten vor und stellt diese analytisch den Anforderungen gegenüber. Der darauffolgende Teil widmet sich komplett der Konzeption, der Umsetzung sowie Evaluation des FluidHaptics Systems. Während [Kapitel 4](#) auf die Entwurfsiterationen eingeht und die Realisierung des FluidHaptics Aufbaus detailliert beschreibt, so konzentriert sich [Kapitel 5](#) komplett auf die durchgeführte Nutzerstudie. Den Leser erwartet dort das Studiendesign, die Erläuterung der angewandten Methodik, sowie die Auswertung als auch die Interpretation der Ergebnisse. Das [Kapitel 6](#) liefert ein Fazit zu dieser Arbeit und bietet darüber hinaus einen Ausblick auf weiteren Forschungsbedarf.

² <https://www.leapmotion.com/> aufgerufen am 23.06.2016

³ <https://www.gloveonevr.com/> aufgerufen am 23.06.2016

Teil I

HAPTİK IN DER VIRTUELLEN WELT

Im folgenden Bereich werden die Grundlagen der Physiologie der Hand beschrieben, die technologischen Ansätze zur Erzeugung von taktilen Reizen erläutert und ausgewählte, verwandte Arbeiten vorgestellt und den zuvor definierten Anforderungen gegenübergestellt.

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über das Forschungsfeld der Haptik im Kontext der Mensch-Maschinen Interaktion. Eingegangen wird zu Beginn auf die Anatomie und Architektur der menschlichen Hand. Im weiteren Verlauf wird die Greifbewegung analysiert und eine Abgrenzung zu unterschiedlichen Phasen des Greifens geschaffen, sowie Eigenschaften der Greifbewegung extrahiert. Darüber hinaus wird die kognitive Wahrnehmung von haptischen bzw. taktilen Reizen erläutert und der Übergang von den psychologischen Ansätzen zu denen der Mensch-Maschinen Interaktion geschaffen.

Die letzten beiden Unterkapitel beschreiben das Themenfeld der Mixed Reality sowie die unterschiedlichen technologischen Ansätze zur Realisierung von haptischen Reizen, beispielsweise mit Hilfe elektro- oder magnetorheologischen Flüssigkeiten - auch bekannt als intelligente Flüssigkeiten (Smart Fluids).

2.1 PHYSIOLOGIE DER HAND

In diesem Abschnitt werden die fundamentalen Grundlagen der Physiologie der menschlichen Hand beschrieben. Es werden zusätzlich Taxonomien der Greifbewegung vorgestellt, sowie der Hintergrund taktiler Wahrnehmung beleuchtet.

2.1.1 *Menschliche Hand*

Um sich dem Thema der Haptik zu nähern, muss man sich zwangsläufig mit der Anatomie der menschlichen Hand beschäftigen. Der Aufbau einer einzelnen Hand besteht aus insgesamt

- 14 Fingerknochen
- 5 Mittelhandknochen
- 8 Handwurzelknochen

Diese 27 Knochen werden von 29 Muskeln gestützt und gesteuert [28]. Im Grunde handelt es sich dabei um eine Handfläche sowie fünf Fingern. Nicht nur die Größe der einzelnen Finger unterscheidet sich, sondern auch deren Funktionalität. Der Daumen ermöglicht uns insbesondere durch seine Dynamik das Greifen. Der Daumen kann, im Gegensatz zu den restlichen Fingern, allen anderen Fingern entgegengestellt positioniert werden. Durch diese Fähigkeit können

Objekte zwischen dem Daumen und den jeweiligen anderen Fingern fixiert werden.

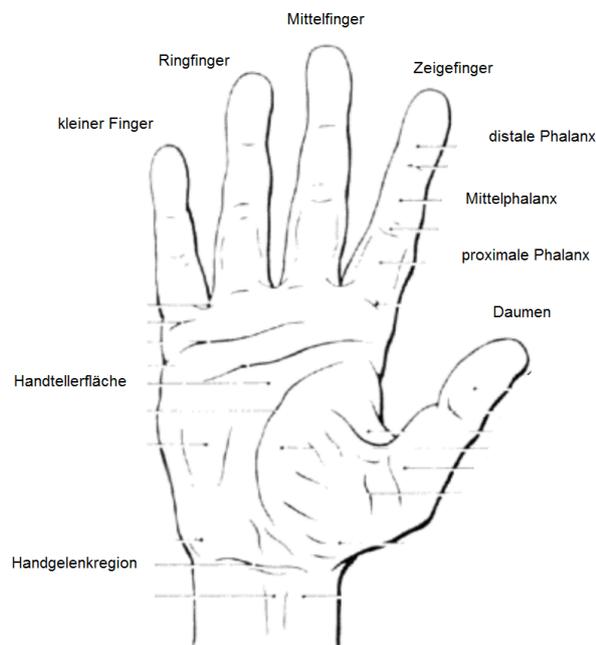


Abbildung 1: Die menschliche Hand bestehend aus der Handtellerfläche und fünf Fingern. Bis auf den Daumen bestehen alle Finger aus drei Fingerknochen (Phalanx). Der Daumen besteht aus zwei Fingerknochen. Die Illustration wurde von Kapandji [29] übernommen.

Beschrieben werden die Richtungen einer Hand mit den Begriffen *palmar* (handflächenseitig), *dorsal* (zum Handrücken hin gelegen), *distal* (vom Körperzentrum entfernt) und *proximal* (zum Körperzentrum hin).

Die Bewegungen der Hand bezeichnet man als *Adduktion* (alle Finger werden aneinander gedrückt), *Abduktion* (Finger werden gespreizt), *Flexion* (Finger werden in Richtung Handinnenfläche gebeugt) und *Extension* (Finger werden nach aussen gestreckt). Einen hervorragenden, detaillierten Überblick über die Funktionalität und der Anatomie der Hand liefern Jones und Lederman in ihrem Werk ‚Human Hand Function‘ [28].

Die flexiblen Bewegungen der Hand, sowie die opponierbare Eigenschaft des Daumens veranlasst uns Menschen mit den Händen Objekte zu greifen, diese Objekte in ihrer Form wahrzunehmen aber auch ihre Beschaffenheit sowie ihre Position zu manipulieren. Das Ergreifen eines Objekts ist somit eines der wichtigsten Aufgaben der menschlichen Hand.

2.1.2 Greifbewegung

Grundsätzlich sollte bei der Disziplin Mensch-Maschinen Interaktion bei der Entwicklung neuartiger Interaktionen der Fokus auf dem künftigen Benutzer liegen. Es heißt, der Benutzer eines Systems soll möglichst intuitiv interagieren können. Das Greifen ist intuitiv, denn bereits Babys und sogar Frühgeborene besitzen einen Greifreflex der durch das Reizen der Handinnenfläche ausgelöst werden kann - der sogenannte palmare Greifreflex. Dabei ist zu beobachten, dass beim Erzeugen von Druck auf die Handinnenfläche, eine Flexion der Finger ausgelöst wird und der Säugling eine Faust bildet. Was zu Beginn unkontrolliert erscheint, entfaltet sich in der weiteren Entwicklung zur Fähigkeit des Greifens. Aus einem menschlichen Urinstinkt, der ursprünglich für einen sicheren Halt bei der Mutter oder anderen Bezugspersonen sorgen soll, erlernt der Mensch somit bereits in den ersten Monaten seines Lebens intuitiv nach Objekten zu greifen, diese anhand ihrer Beschaffenheit zu differenzieren und deren Position zu verändern [13].

In den folgenden Unterkapiteln werden die Phasen während des Greifens identifiziert und klassifiziert. Darüber hinaus werden unterschiedliche Greifarten illustrativ beschrieben und Taxonomien eruiert.

2.1.2.1 Definition für Greifen

Obwohl, oder geradezu aufgrund der Tatsache, dass das Greifen eine konventionelle Fähigkeit der Menschen ist, findet man in all den Arbeiten selten eine allgemeingültige Definition.

Beispielsweise im Bereich der Prothesenforschung definiert Feix et al. [10] das Greifen, im Zuge seiner Arbeit zur Validierung von Greifbewegungen von Roboterhänden im Vergleich zur menschlichen Hand, wie folgt:

„A grasp is every static hand posture with which an object can be held securely with one hand.“ [10]

Nach dieser Definition wäre das Positionieren eines Objekts auf den Handrücken, während die palmare Seite zum Boden gerichtet ist ebenfalls ein Greifen. Dies jedoch schließt Feix et al. in seiner Arbeit explizit aus der Definition aus[10].

Eine weitaus genauere, auf Interaktionen bezogene Definition, liefert Raphael Wimmer in seiner Dissertation ‚Grasp-Sensitive Surfaces - Utilizing Grasp Information for Human-Computer Interaction‘ [66]:

„Grasping is the act of bringing body parts - usually parts of the hand - into physical contact with an object, thereby weakly or strongly binding the object’s movement to the movement of the body parts in at least two opposite directions through friction or

obstruction of the object's movement, independant of gravity or other forces acting on the object"[66]

Wimmer unterscheidet zwischen dem Verb greifen und dem Substantiv Griff, wobei der Griff ein Zustand ist und das Greifen zu diesem Zustand führt.

Das Beispiel mit dem Objekt auf dem Handrücken, wurde von Wimmer implizit ausgeschlossen, da ein Greifen die Kontrolle über das Objekt impliziert und die vorgegebene Richtung der Schwerkraft keine Rolle spielt.

Im weiteren Verlauf der Arbeit wird sich nach der Definition von Wimmer orientiert.

2.1.2.2 Greifphasen & -arten

Besonders im Kontext der digitalen Erkennung von Gesten oder Greifbewegungen ist es zwingend notwendig den Anfang und das Ende dieser relativ kontinuierlichen Abläufe zu bestimmen, um diese voneinander abzugrenzen. Bei Gesten hat Adam Kendon [30] drei generelle Phasen identifiziert, die sich ebenfalls auf die Greifbewegung überführen lassen.

- *preparation*

Die Vorbereitungsphase wird dazu genutzt um den eigenen Körper für den Empfänger in eine sichtbare Position zu bringen

- *stroke*

Die zweite Phase beschreibt die Folge der zu beobachteten Gestenbewegung

- *recovery*

In der Rückzugsphase wird der Körper vom Gestikulierenden in die Ruhephase gebracht

Innerhalb der Vereinigung von Preparation und Stroke sind laut Kendon [30] Gesten zu identifizieren. Auch wenn der Biologe Adam Kendon seine Forschungsarbeit im Feld der Kognition vollzieht, so kann man diese Erkenntnisse ohne Weiteres im Kontext der Mensch-Maschinen Interaktion anwenden. Eine detailliertere Beschreibung, bezogen auf das Greifen, wurde von Johansson und Westling [65] beschrieben. Insgesamt sieben Phasen wurden durch eine Studie ([Abbildung 2](#)) identifiziert und von Johansson und Westling wie folgt unterteilt:

- a) *preload phase*

Finger formen die Griffhaltung

b) *loading phase*

Finger umklammern das Objekt. Die einzusetzende Kraft ist abhängig von der Oberfläche des Objekts und des Gewichts. Die Greifkraft steigt solange bis die Gravitation überwunden ist.

c) *transitional phase*

In dieser Phase wird das Objekt von einer Ursprungsposition auf eine Zielposition überführt

d) *static phase*

In der statischen Phase ist die Position des Objekts sowie die Greifkraft jeweils im gleichförmigen Zustand

e) *replacement phase*

Das Objekt wird auf die Zielposition abgesenkt

f) *delay*

Vor dem Loslassen des Objekts kommt es zu einer variablen Verzögerung

g) *unloading phase*

Am Ende wird das Objekt von der Hand losgelassen

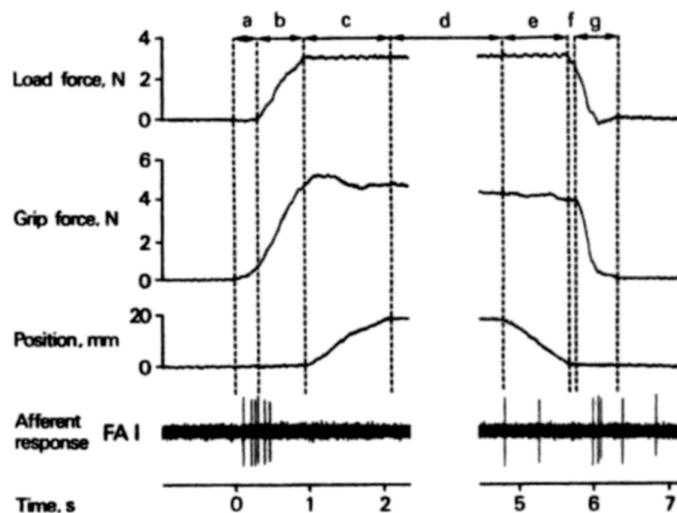


Abbildung 2: Während einer Studie sollten Probanden ein Objekt anheben und auf eine andere Stelle ablegen. Die wirkenden Kräfte, sowie die überquerte Distanzen wurden gemessen und in einem Graphen dargestellt. Basierend auf diesen Ergebnissen wurden Phasen des Greifens identifiziert. Dieser Graph wurde von Westling und Johansson [65] übernommen

In dieser Arbeit sollen Greifbewegungen durch optische Sensoren identifiziert werden. Die Phasendefinition basiert zwar auf der differenzierten Analyse der wirkenden Griffkräfte, jedoch lassen sie sich überwiegend auch visuell wahrnehmen und abgrenzen. Insofern wird in dieser Arbeit den Erkennungsalgorithmus, abhängig von den genannten Phasen von Westling und Johansson, entwickelt.

2.1.3 Greif Taxonomien

Die menschliche Hand verfügt über insgesamt 27 Freiheitsgrade (DoF, degree-of-freedom), wobei der Ringfinger, Mittelfinger, Zeigefinger und kleiner Finger jeweils 4-DoF, der Daumen aufgrund seiner Opponierbarkeit 5-DoF und das Handgelenk 6-DoF zählen. Durch die Vielzahl an Möglichkeiten können Objekte auf unterschiedliche Art und Weise gegriffen werden. Es existieren viele Klassifizierungen von Greifarten, die im Folgenden erläutert werden.

Grundsätzlich werden in allen Arbeiten Greifarten in zwei große Gruppen geteilt - die Präzisionsgriffe und die Kraft- bzw. Grobgriffe. Von einem Präzisionsgriff wird gesprochen, wenn das Objekt lediglich mit dem Daumen und Zeigefinger fixiert wird, dieser Griff wird auch Spitzgriff oder Pinzettengriff genannt. Ein Grobgriff ist wenn die Hand mit allen Fingern das gegriffene Objekt umfasst. Eine umfassende Klassifizierung wurde von Cutkosky et al. dargestellt. Diese gruppiert unterschiedliche Griffarten in Präzision und Kraft, die wiederum in zirkulare oder prismatische aufgeteilt werden. [Abbildung 3](#) veranschaulicht den Entscheidungsbaum von Cutkosky [9].

Besonders hervorzuheben ist in der Grafik die Relation zur Größe des gegriffenen Objekts. Je kleiner ein Objekt ist desto präziser wird der Griff.

Fußend auf den Taxonomien von Cutkosky et al. sammelte Thomas Feix während seiner Forschungsarbeit insgesamt 45 unterschiedliche Griffarten. Durch Anwenden seiner Definition für eine Greifbewegung dezimierte sich die Anzahl auf insgesamt 33 valide Greifarten. [Abbildung 4](#) veranschaulicht die 33 Griffe, ebenfalls aufgeteilt in Kraft und Präzision. Darüber hinaus unterteilt Feix auch ob der Daumen abduziert oder adduziert wird [10].

In den meisten Arbeiten wird beschrieben, dass das Greifen von offensichtlichen Eigenschaften des Objekts abhängt. So wird beschrieben, dass die Wahl des Griffs von der Form, des Gewichts oder der Größe des Objekts abhängt [28]. Raphael Wimmer stellt jedoch in seiner Dissertation [66] fest, dass nicht nur diese offensichtlichen Faktoren eine Rolle spielen, sondern maßgeblich auch die Aufgabe bzw. das Ziel, welches mit dem Objekt verfolgt wird, entscheidend sind für die Wahl der Greifart.

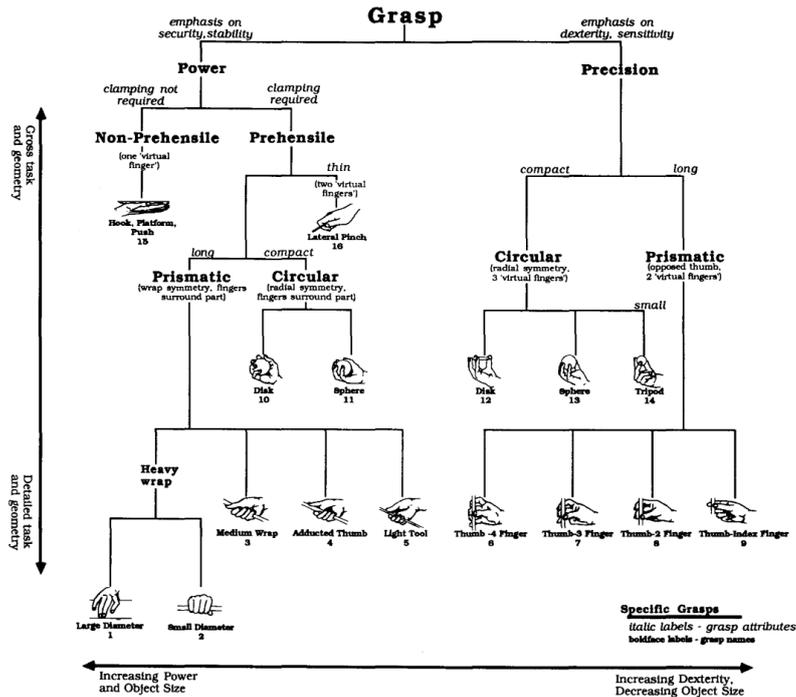


Abbildung 3: Cutkosky gliederte Griffarten in Kraft- und Präzisiongriffe. Der Entscheidungsbaum ist übernommen von Cutkosky [9]

2.1.4 Haptische und taktile Wahrnehmung

Beim Greifen eines Objekts wird bei Menschen das *somatosensorische System* (für die Körperwahrnehmung betreffend) im Gehirn aktiviert, welches für die haptische Wahrnehmung verantwortlich ist. Mit Hilfe dieses Systems können folgende Empfindungen verarbeitet werden:

- *Tiefensensitivität* ist für die Wahrnehmung aus dem Körperinneren verantwortlich und somit zuständig für den Lage- bzw. Positionssinn, Kraftsinn und Bewegungssinn der Glieder und Gelenke, sowie der Muskelstellungen. Es geht im wesentlichen um die Eigenwahrnehmung des Körpers.
- Bei der *Oberflächensensitivität* werden durch unterschiedliche Mechanorezeptoren in der Haut Empfindungen wahrgenommen. Die Reize werden extern, durch Kontakt mit der Haut, ausgelöst und lassen uns Menschen unterschiedliche Größen, Formen und Texturen von diversen Objekten feststellen und unterscheiden.
- Das *Temperaturempfinden* ist neben dem Erkennen von Temperaturunterschieden beim externen Einwirken, auch für die taktile Wahrnehmung von Bedeutung. Die Thermorezeptoren in Form von offenen Nervenenden geben bei Kontakt der Haut mit einem körperfremden Objekt eigene Körperwärme ab oder neh-

	Power					Intermediate			Precision					
	Palm		Pad			Side			Pad				Side	
	3-5	2-5	2	2-3	2-4	2-5	2	3	3-4	2	2-3	2-4	2-5	3
Thumb Abd.														
Thumb Add.														

Abbildung 4: Entscheidungsmatrix nach Feix [10]. Dieser gliedert Griffarten in Kraft-, Präzision und Zwischengriffe. Darüber hinaus unterscheidet er zusätzlich die Position des Daumens - abduktiv oder adduktiv. Die Tabelle ist übernommen aus [10].

men den lokal entstehenden Temperaturunterschied wahr. Die Rezeptoren registrieren diesen Unterschied und erzeugen somit einen komplementären Sinneseindruck, der zur Druckwahrnehmung durch die Mechanorezeptoren führt.

- *Schmerzempfinden* registriert Verletzungen der Haut. Bei der taktilen Wahrnehmung spielt dieses Empfinden eine untergeordnete Rolle.

Wohingegen die Schmerz- und Temperaturwahrnehmung zur Oberflächensensibilität zählen und damit die durch Rezeptoren vermittelte Sensibilität der Haut gegenüber äußeren Reizen umfassen. So zählen die Propriozeption sowie die Kinästhesie zur Tiefensensibilität, die im wesentlichen eine Eigenwahrnehmung ist, bei der unser Körper das Gehirn über die Position und Stellung der Gelenke und Muskeln zu einander informiert und uns dazu befähigt spezifische Körperbewegungen zu steuern.

Die Haptik ist also ein Zusammenspiel aus der Tiefen- sowie der Oberflächensensibilität.

2.1.4.1 Relevante Schwellenwerte

Die bereits erwähnten unterschiedlichen Mechanorezeptoren ermöglichen den Berührungssinn (Abbildung 5).

Diese Rezeptoren unterscheidet man nach ihrer Lage auf der Haut und nach der jeweiligen Adaptiondauer. Zum einen gibt es die *Merkelzellen* und *Meissnerkörperchen*, die auf der Hautoberfläche zu finden sind. *Merkelzellen* sind Mechanosensoren und liegen in der behaarten

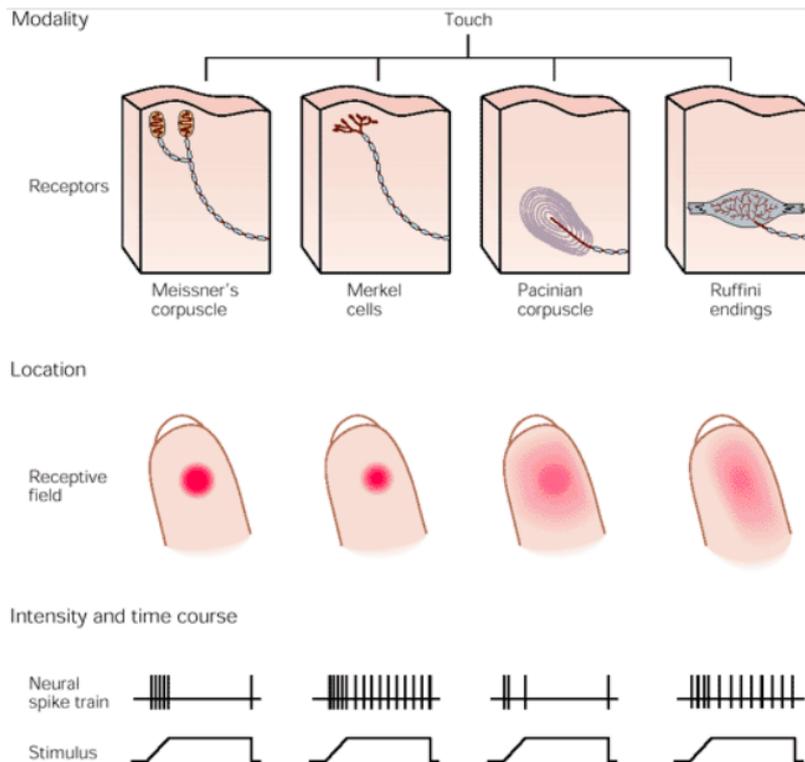


Abbildung 5: Das Sensorsystem weist vier elementare Attribute auf. Hier wird die Zuständigkeit der Zellen und Rezeptoren sowie deren Verortung beim Reizen der Fingerkuppe illustriert. Diese Abbildung ist adaptiert von Gardner [15]

und unbehaarten Hautflächen. Durch ihre enorme Empfindlichkeit nehmen sie bereits leichte Berührungen wahr. *Meissnerkörperchen* sind sogenannte Drucksensorenrezeptoren, die äußerst schnell Informationen, in Bezug auf Form und Größe, zu den im Kontakt stehenden Objekten liefern können. Diese Rezeptoren liegen vor allem in unbehaarter Haut.

In den tieferen Hautschichten liegen weitere Rezeptoren. Dazu gehören die *Ruffinikörperchen*, die Druck und Berührungen registrieren, jedoch relativ langsam adaptieren, darüber hinaus aber die Dehnung der Haut wahrnehmen. In der Unterhaut liegen des weiteren noch die *Vater-Pacini-Körperchen*. Diese haben die schnellste Adaptionszeit und detektieren die Vibration. Alle genannten Rezeptoren wurden nach ihren jeweiligen Entdeckern benannt.

Die Wahrnehmung von Druckstärken ist sehr subjektiv und wird von allen Menschen unterschiedlich beschrieben. Weinstein et al. [63] hat nicht desto trotz in seiner Arbeit Schwellenwerte identifizieren können, bei denen Probanden ab einer bestimmten Mindestdruckstärke etwas gespürt haben. Weinstein unterscheidet zwischen Männern und Frauen und misst lediglich die Wahrnehmung auf der Handinnenfläche und der Fingerkuppe des Zeigefingers. [Tabelle 1](#) listet die Ergebnisse [63] konvertiert in Gramm auf.

	Handinnenfläche	Fingerkuppe
Männer	0,158 g	0,055 g
Frauen	0,032 g	0,019 g

Tabelle 1: Schwellenwerte taktiler Reize, unterschieden in Männer und Frauen. Gemessen wurde der Druck auf die Handinnenfläche sowie die Fingerkuppe des Zeigefingers [63]. Werte wurden konvertiert von Newton in Gramm.

Für die vorliegende Arbeit ist der Wert, welcher bei der Fingerkuppe gemessen wurde von hoher Wichtigkeit, denn dieser Schwellenwert dient als Benchmark beim Vergleich verwandter Arbeiten. Darüber hinaus setzt dieser Wert ebenso die Voraussetzung für den zu entwickelnden Handschuh ‚FluidHaptics‘.

Doch nicht nur der Schwellenwert zur Wahrnehmung taktiler Reize ist von Interesse, sondern auch das Verhältnis von einem bestimmten Druck zu einem nächst Stärkeren. Können Menschen zwei unterschiedliche Druckstärken voneinander unterscheiden, bzw. welche Differenz ist mindestens von Nöten um einen Reizzuwachs zu registrieren? Bereits 1834 machte Ernst Heinrich Weber die Beobachtung, dass menschliche Sinnesorgane erst bei bestimmten Intensitätsstärken eine Veränderung wahrnehmen - man spricht von der ‚differentiellen Wahrnehmbarkeitsschwelle‘ (englisch: just noticeable difference; JND).

Das auf den Beobachtungen resultierende Webersche Gesetz setzt den aktuell wahrgenommenen Druck mit einem neuen Druckimpuls ins Verhältnis:

$$k = \frac{\Delta R}{R} \quad (1)$$

Die so zustande kommende relative Unterschiedsschwelle ist beim Tastsinn bei etwa 3%. Das heißt, damit ein Mensch einen Unterschied von einem Druckreiz zum anderen feststellen kann, muss dieser um mindestens 3% zunehmen um ihn als stärker wahrzunehmen[23].

2.1.4.2 Identifikation von Objekten

Das haptische Erkennen von realen Objekten verläuft immer nach einem Muster, welches sich bei Menschen bereits im Kleinkindalter entwickelt [35]. Der Prozess ist folgendermaßen gegliedert:

a) *Lateral motion*

- Durch Streichen bzw. Reiben über das Objekt bestimmen wir die Textur

b) *Pressure*

- Den Widerstand stellen wir durch Ausüben von Druck mit den Fingern fest

c) *Enclosure*

- Das Volumen wird durch das Umfassen des Objekts mit der Hand festgestellt

d) *Contour following*

- Wir fahren sämtliche Konturen des Objekts mit der Hand nach um die genaue Form zu bestimmen

Die aufgeführte Explorationsstrategie aus der realen Welt kann analog auf die Interaktion mit virtuellen Objekten überführt werden, um ebenfalls deren Beschaffenheit in der VR-Welt durch simulierte Haptik zu identifizieren.

Lederman & Klatzky haben diesbezüglich eine aufschlussreiche Definition der Objekteigenschaften in einem Schaubild zusammengefasst ([Abbildung 6](#)).

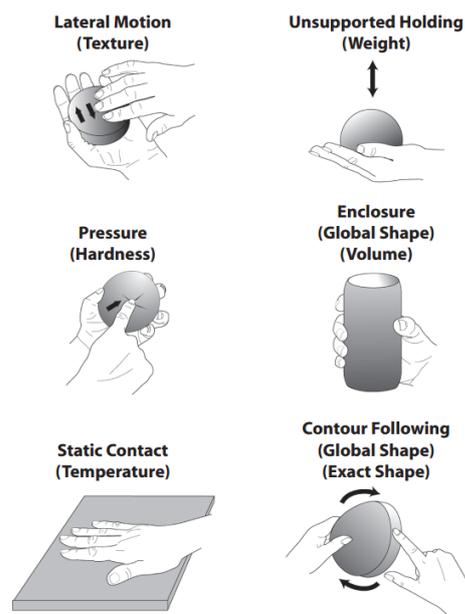


Abbildung 6: Sechs unterschiedliche Objekteigenschaften beim Explorieren [35]

2.2 TECHNOLOGIEN DES HAPTISCHEN FEEDBACKS

Das Erfassen von Gesten bzw. der freien Bewegung der Hände und somit auch die Gelenkstellung wurden in den vorangegangenen Kapiteln ([Unterabschnitt 2.1.1](#), [Unterabschnitt 2.1.2](#), [Unterabschnitt 2.1.3](#),

Unterabschnitt 2.1.4) erläutert. Die Technologien, die Griffbewegungen durch haptisches Feedback erweitern können, stelle ich nun vor und unterteile diese in zwei Hauptgruppen. Technologien mit kinästhetischen Feedback und die mit taktilen Feedback.

Wie oben bereits erwähnt, handelt es sich bei der Kinästhesie um die Tiefensensibilität, dem Bewusstsein der Gelenkstellung. Es existieren unterschiedliche Ansätze, die ein sogenanntes kinästhetisches Feedback durch das extern eingeleitete Steuern der Hände auslösen. Man spricht dabei von der Krafrückkopplung (Force Feedback). Hierbei werden tatsächlich die Positionen der einzelnen Finger durch externe Geräte beeinflusst.

In enger Zusammenarbeit mit der Robotik wurden Exoskelette entwickelt, die die interagierende Hand stützen, fremdsteuern oder einfache virtuelle Widerstände fühlbar machen können. Oftmals in der Industrie wird die Phantom Omni Reihe¹ verwendet. Hierbei handelt es sich um einen Eingabestift, welcher an einem Roboterarm befestigt ist. Designer verwenden dieses Eingabegerät um 3D-Modelle in CAD-Anwendungen zu entwerfen. Sobald man mit dem Cursor innerhalb der CAD-Modellierung auf einen virtuellen Widerstand gelangt, simuliert der Roboterarm diesen Widerstand und blockiert die Bewegung.

Ein auf der TEI 2015 Konferenz vorgestelltes Open-Source Projekt, namens WoodenHaptics ähnelt zwar stark der Omni-Reihe, ist jedoch aufgrund ihres modularen Aufbaus dienlich für Erweiterungen und für Interaktionsdesigner während der Sketchingphase hilfreicher [14]. Diese Do-It-Yourself Variante hat die gleiche Funktionalität und lässt den Benutzer ebenfalls durch einen virtuellen Raum explorieren und Widerstände durch Force-Feedback erfühlen. Die entgegengerichtete Kraft ist abhängig von der Stärke der verwendeten Motoren und daher individuell selbst bestimmbar. Der Arm besteht, wie der Name bereits erahnen lässt, aus einzelnen Holzkomponenten, die mit einem Laserschneider zurecht geschnitten wurden.

Force-Feedback Handschuhe ermöglichen dem Benutzer eine freiere Bewegung in der Luft, da man sich nicht an die Position des Roboterarms richten muss. Von der Firma CyberGloveSystems² wird der Datenhandschuh CyberGrasp angeboten. Dabei werden einzelne Finger mit Motoren verbunden, die dann einen Widerstand simulieren können. So können Benutzer ihre Finger bei Bedarf nur eingeschränkt bewegen. Dieser Exoskelet ermöglicht es die Größe oder Form von unsichtbaren computergestützten Objekten zu bestimmen. CyberGrasp erzeugt eine Kraft von 12 Newton (zur besseren Vorstellung: ca. 1.2 kg) auf jeden einzelnen Finger und lässt den Benutzer sehr realistisch Objekte erfühlen. Der Nachteil ist, aufgrund der ver-

¹ <http://www.dentsable.com/products-haptic-devices.htm> aufgerufen am 12.07.2016

² <http://www.cyberglovesystems.com/cybergasp/> aufgerufen am 12.07.2016

bauten Hardware, das Gewicht. Mit ca. 500g Gewicht pro Handschuh kann die Interaktion hiermit schnell zu einer Belastung werden.

Um feinere Formen, bzw. auch Texturen eines Objekts zu erfühlen, reicht das kinästhetische Feedback nicht aus. Diese weitaus feinere Form der Wahrnehmung wird mit taktilen Feedback erzeugt. Hierbei existieren unterschiedliche Ansätze, die wir in die Kategorien ‚Gerätegebunden‘ und ‚In freier Luft‘ unterteilen. Das Gefühl der ertastbarkeit von virtuellen Objekten wird bei ‚Gerätegebundenen‘ Technologien durch bspw. mechanischen Vibrationen in Datenhandschuhen oder aber in Touchscreens erzeugt. Ein weiterer Ansatz ist es elektrostatischen Druck auf die Finger des Benutzers auszuüben und somit auf glatter Oberfläche, wie z.B. einem Smartphone, einzelne Konturen oder Texturen fühlbar zu machen. Eine weitere Möglichkeit ist es Elektromagnete mit justierbarer Intensität in Handschuhe zu verpacken und somit ebenfalls haptisches Feedback auszulösen. Wobei beim Letzteren die Größe und Anzahl der Elektromagnete entscheidend wäre ob es sich dabei um taktilen oder kinästhetischen Feedback handeln würde.

Ein Beispiel für vibrierende Handschuhe ist die Lösung von der Firma Neurodigital Technologies mit dem Produkt GloveoneVR³. In deren Handschuh sind zehn Vibrationsmotoren verbaut, wobei die Fingerkuppen sowie die Handinnenfläche gereizt wird. Die Motoren in der Handinnenfläche erzeugen durch die Vibrationen hauptsächlich das Gefühl für das Gewicht, bzw. der Masse eines virtuellen Objekts. Die Vibrationen auf den Fingerkuppen simulieren den Tastsinn. Ähnlich zu FingerFlux [64] kann durch negatives Schalten der verbauten Magnete ein direktionales Feedback erzeugt werden, sodass man auch von kinästhetischem Feedback sprechen muss.

Die Idee der elektrostatischen Reize auf Oberflächen, wie Smartphones oder gewöhnlichen Touchscreens ist das Resultat einer Doktorarbeit von Ville Makinen von der Universität Helsinki. Sein Spin-off ‚Senseg‘, gekoppelt an sein Patent[38], stellte auf der CES 2015 das Produkt vor, bei dem Konturen sowie einfache Texturen auf einem Touchscreen fühlbar gemacht worden sind. Der Benutzer streicht über einen glatten Bildschirm und spürt durch elektrostatische Reize die Unebenheiten. Der Senseg Feelscreen ist auf der CES 2015 hauptsächlich für die Automotive Branche beworben worden.

Sowohl die gerätegebundenen Ansätze zur taktilen Feedbackerzeugung als auch alle Ansätze des kinästhetischen Feedbacks haben eine Fülle an Hardware, die von Nöten ist um diese Sinnesempfindungen auszulösen. Oftmals kann jedoch genau diese Menge der entscheidende Faktor sein, der potentielle Benutzer, trotz der eindrucksvollen und bedeutenden Effekte des haptischen Feedbacks, von den Technologien abschreckt. Technologien, die taktile Reize in der Luft auslösen,

³ <https://www.gloveonevr.com/> aufgerufen am 13.07.2016

haben das Ziel eben diese Menge an Hardware von dem Benutzer fernzuhalten.

Das Berühren von virtuellen, in der Luft definierten Objekten ohne zusätzliche Hardware mag sich etwas übersinnlich anhören. Was letztlich bei dieser Form des taktilen Feedbacks geschieht ist jedoch ziemlich einfach - die Luftzirkulation wird beeinflusst. Dies kann durch Luftdruckapparate [56] geschehen, durch Gaszufuhr in einen abgeschlossenen Bereich, durch vakuumerzeugende Geräte [19] oder auch durch das akkurate Ausstrahlen von Ultraschallwellen [7], die die Luft punktgenau zusammenpressen und dem Benutzer einen taktilen Reiz ermöglichen.

2.3 MIXED REALITY

Bei Mixed Reality spricht man laut Definition nach Milgram und Kishino von einer Verschmelzung von physischen und virtuellen Objekten, dargestellt auf einem einzigen Display[43]. [Abbildung 7](#) veranschaulicht vereinfacht das ‚Virtualitätskontinuum‘ und verortet Mixed Reality darin. Die Intensität der Verschmelzung ist ausschlaggebend, ob es sich um eine vollkommen virtuelle Realität oder um eine erweiterte Realität handelt. Im Kontext dieser Arbeit wird durch ‚FluidHaptics‘ eine virtuelle Realität durch reale Haptik erweitert und somit eine Erweiterte Virtualität geschaffen.

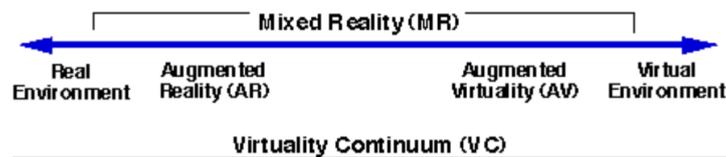


Abbildung 7: Zwischen der Realität und der Virtualität existiert die erweiterte Realität, Augmented Reality (AR), und die erweiterte Virtualität, Augmented Virtuality (AV). Diese beiden Zwischenformen sind Mixed Realities (MR), gemischte Realitäten. In der Mixed Reality werden die reale Welt oder die virtuelle Welt miteinander kombiniert.

Mixed Reality Anwendungen profitieren häufig von Vorteilen der virtuellen und realen Welt. Virtuelle Objekte halten sich nicht an physikalische Gesetze und können bspw. schweben. Der Einfluss aus der Realität könnte die Haptik sein, die wir von realen Objekten kennen.

Eine von vornherein als Mixed Reality deklarierte Brille ist die HoloLens von Microsoft, die jedoch erst im 4. Quartal 2016 auf den Markt kommen wird. Hierbei behält der Betrachter sein gewohntes natürliches Sichtfeld, welches durch computergenerierte Objekte, projiziert auf den in der Brille befindenden Screen erweitert wird. Neben den bekannten Problemen bei tragbaren Geräten, wie z.B. der Akkulaufzeit oder der limitierten Hardwareleistung, wurden bei Release

von AR-Brillen immer häufiger die Stimmen zur Verletzung der Privatsphäre lauter.

Wohingegen AR-Brillen das reale Sichtfeld im Fokus belassen und lediglich eine Veredelung des Gesehenen stattfindet, handelt es sich bei VR-Brillen um ganzheitliche virtuelle Szenerien, die dem Benutzer dargestellt werden. Die bekanntesten Virtual Reality Brillen sind die Oculus Rift und die HTC Vive. Die verbauten Bewegungssensoren erkennen die Position sowie Neigung des Kopfes. Das Gerät kommuniziert fortlaufend mit einer 3D-Engine, die eine 3D-Welt innerhalb der Brille darstellt und ermöglicht es somit dem Benutzer in die 3D-Szenerie quasi ‚einzutauchen‘. Diese headmounted displays (HMD), die grundsätzlich für die VR-Welt entwickelt sind, können durch einen zusätzlichen Kameraaufsatz zu AR-Datenbrillen erweitert werden.

In Anbetracht dieser Arbeit, die sich mit dem haptischen Feedback von virtuellen Objekten beschäftigt, eignen sich 3D-Displays und AR- bzw. VR-Brillen auf Grund ihrer volumetrischen Darstellungskraft, weil sie dem Benutzer die Interaktion bzw. Manipulation von Objekten in der Tiefe erlauben.

2.4 ELEKTRO- UND MAGNETORHEOLOGISCHE FLÜSSIGKEITEN

Elektro- bzw. magnetorheologische Flüssigkeiten werden auch als intelligente Flüssigkeiten bezeichnet (Smartfluids). Der Begriff Rheologie setzt sich zusammen aus den altgriechischen Wörtern *rhei* ‚fließen‘ und *logos* ‚Lehre‘ und steht für Fließkunde ⁴.

Im wesentlichen haben intelligente Flüssigkeiten die Eigenschaft ihre Viskosität zu verändern. Dies erfolgt bei elektrorheologischen Flüssigkeiten durch den Einsatz von elektrischer Spannung. Wird diese zugeführt, so ändert sich die Flüssigkeit abhängig von der Stärke der Spannung kontinuierlich von zähflüssig zu fest. Dies gewährleistet die Flüssigkeit ebenso reversibel, d.h. nach Senkung von elektrischer Spannung wird das Material erneut zähflüssig bzw. flüssig. Analog zu diesem Verhalten können magnetorheologische Flüssigkeiten ebenfalls ihre Viskosität ändern.

Anstatt mit elektrischer Spannung wird dies jedoch mit einem magnetischen Feld realisiert. Wohingegen bei elektrorheologischen Flüssigkeiten meist ein Gemisch aus elektrisch polarisierbaren Teilchen oder Tröpfchen, sowie aus einer elektrisch nicht leitenden Trägerflüssigkeit (bspw. Silikonöle) zum Einsatz kommen, so handelt es sich bei magnetorheologischen Fluiden um eine Mischung aus magnetisch polarisierbaren Teilen (bspw. Eisenspäne) und ebenfalls einer Trägerflüssigkeit, z.B. pflanzliches Öl [32] [48]. [Abbildung 8](#) illustriert das Verhalten von magnetorheologischen Fluids mit und ohne Kontakt eines magnetischen Feldes. Magnetorheologische Flüssigkeiten sind

⁴ <http://www.chemie.de/lexikon/Rheologie.html> abgerufen am 29.08.2016

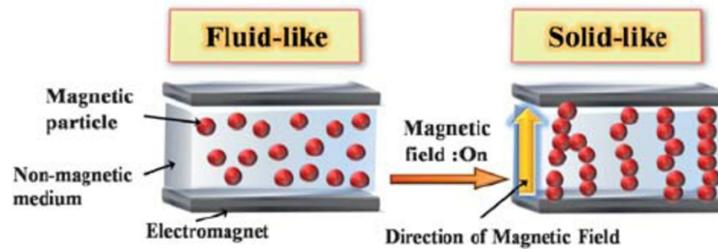


Abbildung 8: Simulation der Ausbildung von Partikelketten im externen Magnetfeld. Links ohne Magnetfeld. Rechts mit Magnetfeld. Abbildung ist übernommen von [49].

Eigenschaft	MRF	ERF
Fließgrenze	50–100 kPa	2–5 kPa
Spannungsquelle	2–24 V @ 1–2 A	2–5 kV @ 1–10 mA
Reaktionszeit	wenige Millisekunden	wenige Millisekunden
Feldstärke	~250 kA/m	~4 kV/mm
Temperatur im Betrieb	-40 °C bis zu +150 °C	-25 °C bis zu +125 °C

Tabelle 2: Gegenüberstellung der Eigenschaften von magnetorheologischen und elektrorheologischen Flüssigkeiten. Unter Beibehaltung ähnlicher Reaktionszeiten lassen elektrorheologische Fluide mit geringerer Feldstärke ihre Viskosität ändern. [50]

bereits seit den 1940er Jahren bekannt, jedoch konnte man lange Zeit aufgrund der negativen Merkmale dieser Fluide keine Produkte in Serie herausbringen. Negative Charakteristiken sind durch den Einsatz von Eisenpartikeln der Verschleiß jener Teilchen durch Sedimentation oder aber auch Korrosion [5] [6]. Erst in den letzten Jahren konnten diese Nachteile behoben werden, sodass diese Art der Flüssigkeit besonders in der Automobilbranche einen Durchbruch feiern konnte. Es existieren zahlreiche Patente, die sich der Eigenschaft der raschen Viskositätsänderung bedienen, bspw. in der Konstruktion von innovativen Stoßdämpfern [46] [22] [12].

Die Änderungsgeschwindigkeit der Aggregatzustände hängt maßgeblich von der Stärke des Magnetfelds aber auch der Anzahl der polarisierenden Partikel in der Flüssigkeit ab [32]. Die Firma Lord Corporation produziert und vertreibt sowohl magneto- als auch elektrorheologische Flüssigkeiten. Die Reaktionszeit von den magnetorheologischen Flüssigkeiten ist bei unter 5 ms, wobei es natürlich von dem jeweiligen Aufbau der wirkenden Magnete abhängt. Die Größe der einzelnen Eisenpartikel wird mit 1 bis 20 Mikrometern benannt⁵.

⁵ [http://www.lord.com/products-and-solutions/active-vibration-control/industrial-suspension-systems/magneto-rheological-\(mr\)-fluid](http://www.lord.com/products-and-solutions/active-vibration-control/industrial-suspension-systems/magneto-rheological-(mr)-fluid) abgerufen am 29.08.2016

Das Vorhaben, durch elektro- bzw. magnetorheologische Flüssigkeiten eine kontrollierte taktile Reizung auszulösen wird in dieser Masterarbeit zwar durch MRF realisiert, doch künftig könnte man die Nachteile zusätzlicher, anzubringender Elektromagneten, welche sehr klobig und auch störend empfunden werden könnten, durch den Einsatz von ERF bewerkstelligen. Hierfür werden die wichtigsten Eigenschaften dieser Fluide tabellarisch (Tabelle 2) gegenübergestellt.

In dieser Arbeit wird eine kostengünstige, selbst entwickelte magnetorheologische Flüssigkeit verwendet, mit dieser zwar eine höhere Reaktionszeit zu erwarten ist, jedoch die Viskositätstransformation sichergestellt ist. Die detaillierte Zusammensetzung dieser Flüssigkeit wird im [Unterabschnitt 4.1.1](#) beschrieben.

2.5 ANFORDERUNGEN

Unter Berücksichtigung der behandelnden theoretischen Grundlagen in den vorhergehenden Kapiteln wurden fünf unterschiedliche Anforderungen an Systeme, die ein taktiles Feedback beim Interagieren in einer MR-Umgebung gewährleisten, definiert. Eine Übersicht über diese Anforderungen erhält man auf der [Abbildung 9](#). In den folgenden Unterkapiteln werden sie im Einzelnen behandelt und ausgeführt.

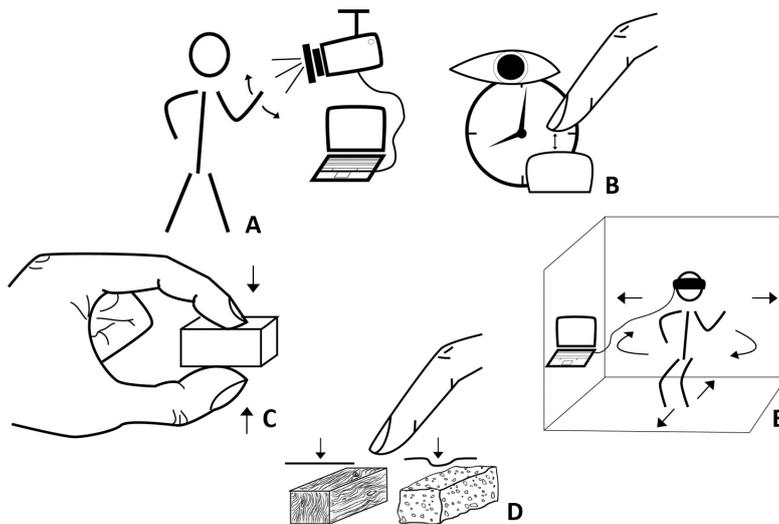


Abbildung 9: Das System soll (A) händische Interaktionen erfassen können, (B) die Kohärenz zwischen dem visuellen und taktilen Feedback einhalten und (C) gewährleisten, dass Objekte gegriffen werden können. Außerdem sollen (D) unterschiedliche Härte- bzw. Weichheitsgrade ermöglicht und die (E) Interaktionen im Raum nicht beschränkt werden.

2.5.1 *Digitale Erkennung der händischen Interaktion*

Um Interaktionen innerhalb einer VR oder AR Anwendung zu verarbeiten, muss diese interpretiert werden. In den oberen Kapiteln wurden diverse Technologien zur Erkennung von Gesten oder Bewegungen beschrieben. Es ist von einem enormen Wert die Bewegungen der Benutzer so direkt wie möglich in eine VR Welt zu überführen um die Kohärenz zwischen dem realen Verhalten und dem virtuell Sehenden zu schaffen. Als visuelles Feedback innerhalb der VR/AR Anwendung soll ein virtuelles animiertes Arm/Handmodell dienen. Die reale Position der Hand soll im VR Umfeld ebenso so real wie möglich wahrgenommen werden um die Immersion nicht zu beeinträchtigen.

2.5.2 *Visuelle und taktile Kohärenz*

Der Mensch erwartet beim Ertasten von Objekten einen Druck auf der Haut. Dies erfolgt in einem sehr niedrigen Reaktionszeit Bereich von ca. 10-40ms[28]. Die Kohärenz zwischen dem virtuellem visuellen Feedback und dem simulierten haptischen Feedback muss daher ebenso in diesem Bereich liegen. Eine Verschiebung dieser Reaktionszeit würde den Benutzer maßgeblich irritieren und das Gefühl der direkten Manipulation von Objekten einschränken.

2.5.3 *Unterschiedliche Härte- bzw. Weichheitsgrade*

Der Wahrgenommene Druck auf der Fingerkuppe ist beim Anfassen von Objekten in der realen Welt sehr dynamisch. Bei der Simulation dieses Drucks ist es daher wichtig diese Dynamik beizubehalten, um somit ein realistischeres Abbild zu schaffen. Bisherige Lösungen bieten ausschließlich direkten Druck der zwischen zwei Intensitäten variiert. Es sollen Möglichkeit eruiert werden, mit denen man unterschiedliche Härte- und Weichheitsgrade auf der Haut auslösen kann ohne die zusammenhängenden Anforderungen zu verletzen. Eine Möglichkeit bieten die intelligenten Flüssigkeiten, die aufgrund ihrer Veränderlichkeit in ihrer Viskosität geeignet sein können um vielfältige Druckstärken zu simulieren.

2.5.4 *Ermöglichung von Greifinteraktionen*

Bei all dem Einsatz der Technologien soll eine Greifinteraktion mit Hilfe des Systems umgesetzt werden können. Das Gewicht und die Größe des Systems spielt hierbei eine wichtige Rolle. Klobige Konstruktionen schränken den Benutzer bei der Interaktion grundsätzlich ein. Es soll eine leichtgewichtige Lösung angestrebt werden, um das Greifen im Virtuellen Raum zu gewährleisten.

2.5.5 *Freie Interaktion im Raum*

VR/AR Anwendungen bieten Benutzern neue, erweiterte Möglichkeiten ohne physikalische Eingrenzungen. Virtuelle Objekte können innerhalb der VR/AR Welt mit alternativer Physik in ihrer Form und Position manipuliert werden. Ein bestimmtes Objekt soll somit frei bewegt werden können ohne, dass das zu haptikgebende System den Benutzer in seinen Bewegungen einschränkt. Nicht nur die Handbewegung sondern der gesamte Körper darf keinerlei Beschränkungen erfahren, um die Vorteile der VR/AR zu nutzen. Das haptische System soll nicht einschränken, sondern die Immersion verstärken.

VERWANDTE ARBEITEN

In [Kapitel 2](#) wurden die theoretischen Grundlagen und somit die Basis zur Entwicklung von Schnittstellen mit haptischem Feedback im virtuellen Raum beschrieben. Innerhalb dieses Kapitels wird der aktuelle Stand verwandter Forschungsarbeiten vorgestellt, welche sich mit einer ähnlichen oder eng verwandten Thematik befassen. Diese Arbeiten dienen nicht nur als Inspiration sondern auch als Orientierungshilfe für den Entwurf, sowie die Umsetzung dieser Thesis. Zunächst werden aktuelle Arbeiten vorgestellt, die sich ausschließlich mit dem haptischen Feedback durch Einsatz von intelligenten Flüssigkeiten beschäftigen. Des Weiteren werden auch Arbeiten präsentiert, die sich zur Aufgabe gemacht haben, die menschliche Kognition durch Zugabe von taktilen bzw. haptischen Reizen in virtuellen Welten zu untersuchen.

3.1 ÜBERBLICK VERWANDTER ARBEITEN

Dieses Kapitel liefert einen Überblick über verwandte Arbeiten im Kontext des haptischen Feedbacks. Als Erstes werden fünf unterschiedliche Feedback-Technologien zur Stimulation der taktilen Wahrnehmung beschrieben. Dabei handelt es sich um:

- Force-Feedback
- Vibration
- Ultraschall
- Luftdruck
- Intelligente Flüssigkeiten

Im [Abschnitt 3.2](#) werden ausgewählte Systeme mit den zuvor präsentierten Technologien genauer beschrieben und analysiert. Die Arbeiten werden im [Abschnitt 3.3](#) in Relation gesetzt und den definierten Anforderungen ([Abschnitt 2.5](#)) gegenübergestellt.

3.1.1 Force-Feedback durch Exoskelette

In der Wissenschaft wurde schon relativ früh ein Simulieren von taktilen Reizen angestrebt, interessanterweise fokussierte man sich stets auf Force-Feedback Methoden [3] [18] [8]. Bei Force-Feedback handelt es sich meist um Exoskelette, die als Aufbau auf die Hand befestigt werden und die Gelenkstellung direkt fixieren. Solche Exoskelette existieren in jeglichen Formen, bspw. als Roboterarme, bei denen die menschliche Hand auf den Roboterarm gelegt wird ([Abbildung 10](#)), oder auch als Handschuh ([Abbildung 11](#)), bei dem Fingerglieder nachgebildet sind und die menschliche Hand somit das Verhalten der, meist mechanischen Handschuhe übernimmt.



Abbildung 10: Der Force-Feedback Arm Geomagic Touch (früher Sensable Phantom Omni) [59]

Bei allen Force-Feedback Lösungen wird die menschliche Handstellung direkt durch das System manipuliert und daher nehmen Benutzer oftmals das Gefühl einer „Fremdsteuerung“ wahr. Doch genau

diese Eigenschaft ermöglicht es den größten Druck auf eine Fingerkuppe auszuüben.



Abbildung 11: Cybergrasp Handschuh der Firma CyberGloveSystems LLC. [33]

Besonders hilfreich sind Force-Feedback-Systeme bei der Unterstützung von wiederholenden körperlichen Tätigkeiten, denn durch das gleichzeitige Stützen der Handstellung senkt es die Ermüdung der Hand bzw. des Arms.

3.1.2 *Feedback durch Vibration*

Die Wahrnehmung von taktilen Reizen beim Menschen kann auf drei grundlegenden Varianten ausgelöst werden. Durch Ausübung von Druck, durch Vibration bzw. Reibung und durch merkliche Unterschiede von Temperaturen. Der in der Forschung am weitesten verbreitete Ansatz zur taktilen Reizung ist die Vibration. Seit die ersten kleinen Vibrationsmotoren in Serie produziert wurden, werden diese Vibrationsmotoren in diversen Geräten zur Simulation von Haptik eingesetzt. Verbaut unter den Fingerkuppen, bspw. in einem Handschuh, und angesteuert durch Mikrocontroller lassen sich unterschiedliche Vibrationsintensitäten abbilden. Ein wesentlicher Vorteil dieser Art der taktilen Reizung ist die geringe Größe der Knopf-Vibrationsmotoren. Diese werden von Benutzern kaum wahrgenommen und lassen sich einfach in Handschuhe integrieren. Das Vibrieren des Motors bietet sich hervorragend für kurze Reize an, bspw. beim raschen Streifen von virtuellen Objekten. Das Festhalten oder gar Greifen von Objekten kann durch gewöhnliche Vibrationen jedoch nicht realitätsnah simuliert werden. Allen voran wird das vibrierende taktile Feedback in Studien eingesetzt, bei denen insbesondere das räumliche Gedächtnis oder auch die räumliche Kognition in Verbindung mit Haptik untersucht wird.

3.1.3 *Feedback durch Ultraschall*

Die zuvor erläuterten Techniken zur Generierung von taktilen Reizen waren ausnahmslos gerätebasiert. Das heißt, die Fingerkuppe des Be-

nutzers musste zwingend einen Kontakt zu einem Handschuh oder eine andere Art von technischer Vorrichtung halten, um eine Haptik wahrzunehmen. Beim Ansatz unter Verwendung des Ultraschalls hingegen wird die taktile Reizung mitten in der Luft ausgelöst. Ermöglicht wird dies durch den akustischen Schallstrahlungsdruck. Auch wenn das Phänomen des Ultraschalls schon lange bekannt ist und man den Schallstrahlungsdruck quantitativ im Wasser messen kann, so entwickelte man im Bereich der Mensch-Maschinen Interaktion erst in den letzten 5-10 Jahren erste Systeme mit dieser Technologie.

Im Jahr 2008 haben Wissenschaftler um Shinoda et al. [25] der University of Tokyo im Zuge ihrer Arbeit an kontaktloser Haptik ein System auf Basis eben dieses Schallstrahlungsdrucks entwickelt. Das „Airborne ultrasound tactile display“ kann taktilen Druck durch Ultraschallwellen erzeugen und somit dem Benutzer das Gefühl vermitteln ein virtuelles Objekt zu spüren und dieses zu manipulieren. Der Prototyp, bestehend aus 324 kleinen Ultraschallwandlern, die in einem Hexagon angeordnet sind, erzeugt einen Druck von $1,6\text{g}/\text{cm}^2$. Der konzentrierte Ultraschallimpuls ist bei einer Frequenz von 1kHz kaum noch als Vibration wahrzunehmen [25].

Auf der Ars Electronica 2016 in Linz hatte man die Möglichkeit das an Airborne angelehnte Folgesystem von Shinoda et al. zu testen. Das Haptoclone Display [39], welches aus 996 Ultraschallwandlern besteht (4×249) und als Joch aufgebaut ist, ermöglicht dem Benutzer seine Hand in diesen Aufbau zu strecken. Ein virtuelles Objekt, welches in den Aufbau semi-holografisch hineinprojiziert wird kann dann vom Benutzer berührt werden. Während einer Umfrage in der Ausstellung, wurde das erzeugte taktile Feedback von vielen Besuchern mit schwachen Stromstößen verglichen.

Der große Vorteil dieser Technik ist die Simulation von Haptik mitten in der Luft ohne dem Benutzer vorher mit Geräten auszustatten. Der relativ schwache Druck, mit bis zu maximal $2,6\text{g}/\text{cm}^2$ [7] lässt die Technologie das Greifen von Objekten leider nicht realitätsnah zu. Hinzu kommt, dass die Intensität des Drucks nicht variiert werden kann, sondern immer konstant bleibt.

3.1.4 *Feedback durch Luftdruck*

Ebenso wie mit der Ultraschalltechnologie lässt sich eine haptische Stimulation durch Luftdruck mitten in der Luft ohne Gerätebindung realisieren. Bei solchen Systemen werden elektrische Pumpen eingesetzt, die einen Unterdruck bzw. Überdruck erzeugen, der wiederum durch einen Schlauch oder eine Düse punktuell in Richtung der Fingerkuppe gesteuert werden kann.

Neben der enormen Lautstärke, die eine elektrische Luftpumpe verursacht, hat man bei dieser Technologie das Problem der Luftstreuung. Sobald die Luft aus einer Düse gepresst wird, verteilt sich die-

ser Luftstrom kegelförmig nach außen. Forscher des Disney Research aus Zürich bedienten sich der Luftfahrttechnik und adaptierten das Verhalten von Wirbelströmen um die Streuung des Luftstrahls zu minimieren. Aereal [56] heißt das System, welches 2013 von Sodhi et al. vorgestellt wurde. Die Lösung verfügt über kleine Luftkanonen, die Luftwirbel generieren und diese an fokussierte Stellen mitten in der Luft stoßen.

Neben der kontaktlosen Lösung um taktile Reize mitten in der Luft zu erzeugen, werden auch gerätebasierte Systeme angestrebt. Als Beispiel dient ein Studentenprojekt der Rice University. Diese haben im Jahr 2015 in Zusammenarbeit mit der Firma Virtuix¹ einen Prototyp entwickelt, der dafür sorgt, dass man bei Berühren eines Gegenstandes in der virtuellen Realität haptisches Feedback durch Luftdruck erhält. Es handelt sich um einen Handschuh, bei dem unter den Fingerkuppen kleine Luftkissen integriert sind. Die Kissen werden durch eine Luftdruckpumpe innerhalb einer externen Box angesteuert. Somit können unterschiedliche Intensitäten des Drucks simuliert werden [62].

In Anbetracht dieser Masterarbeit, die das Ziel hat haptisches Feedback in Greifgesten zu integrieren, ist der Prototyp der Studentengruppe der Rice University diesem Ziel am nächsten. Mit dem vorgestellten VR-Handschuh können unterschiedliche Druckstärken erzeugt werden. Das Gewicht, mit 350g, wird von den Probanden nicht als störend empfunden (störend wird es ab 660g wahrgenommen) [62]. Einer der Nachteile ist die Lautstärke der Luftdrucksteuerung bzw. der Pumpe.

3.1.5 *Feedback durch intelligente Flüssigkeiten*

Im [Abschnitt 2.4](#) wurden bereits intelligente Flüssigkeiten und deren Eigenschaften erläutert. Wie man mit diesen besonderen Materialien ein taktiles Feedback erzeugen kann wurde im Jahr 2007 von Sgambelluri et al. [54] untersucht. Unter Verwendung von magnetorheologischer Flüssigkeit konzipierten sie ein System bei dem ein Benutzer mit freien Handgesten virtuelle Objekte spüren konnte. Der Aufbau wird in der [Abbildung 14](#) illustriert und im [Abschnitt 3.2](#) genauer beschrieben.

Die besonderen Eigenschaften von intelligenten Flüssigkeiten (ERF oder MRF) eignen sich sehr gut für haptische Schnittstellen, insbesondere die Möglichkeit diese Flüssigkeiten in kleinere Geräte zu integrieren spricht für diese Technologie. Im Gegensatz zu alternativen Ansätzen zur Stimulation von taktilen Reizen, wie z.B. durch Motoren oder Luftdruck, können ERFs in Handschuhe verbaut werden, ohne die Bewegung der menschlichen Hand störend einzuschränken [1].

¹ <http://www.virtuix.com/> abgerufen am 14.10.2016

In nächsten Kapitel werden ausgewählte Arbeiten detaillierter betrachtet und vorgestellt. Anschließend werden diese Arbeiten gegen die Anforderungen getestet und einander gegenübergestellt.

3.2 ANALYSE AUSGEWÄHLTER SYSTEME

MEMICA

Bereits im Jahr 2000 haben die Physiker Bar-Cohen et al. auf der SPIE (Society of Photographic Instrumentation Engineers) Konferenz ein System vorgestellt, welches mit intelligenten Flüssigkeiten einen haptischen Reiz erzeugen konnte. MEMICA [42] heißt das System, was ausgeschrieben für ‚MEchanical Mirroring using Controlled stiffness and Actuators‘ steht. Das Herzstück dieses Prototyps ist ein sogenanntes Electrically Controlled Stiffness (ECS) Element. Das ECS ist ein kleiner Kolben, in dem eine elektro-rheologische Flüssigkeit gehalten wird. Über dem Kolben ist eine Plattform installiert, die durch eine Kupplung verbunden ist. Diese Plattform dient dazu unterschiedliche Gewichte zu messen um klassifizieren zu können, welcher Druck durch das ECS ausgelöst werden kann.

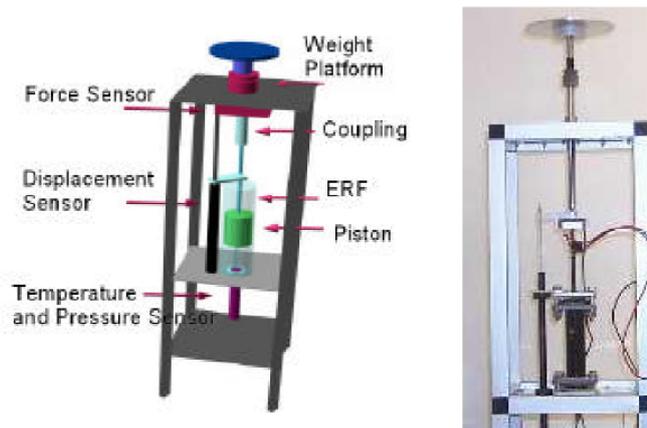


Abbildung 12: Memica Versuchsaufbau aus dem Jahr 2001. Abbildung wurde aus [41] übernommen.

Abbildung 12 illustriert diesen Aufbau. Die Idee ist es diesen Kolben, in einer kleineren Ausführung, gezielt einzusetzen und diesen bspw. in einem Handschuh zu verbauen, um einen Druck an gewünschten Stellen zu erzeugen. Ein im Paper genannter Anwendungsfall ist das Steuern eines Roboterarms durch bspw. einen Chirurgen während einer roboter-assistierten Operation. Das ECS könnte potentielle haptische Reize, die ein Roboterarm durch seine Sensoren detektiert, simulieren und somit dem Chirurgen während der Operation sensibler agieren lassen.

Ausgehend von dieser Idee konzipierten Bar-Cohen et al. im Folgejahr einen Handschuh [1], der mit um ein Vielfaches verkleinerten ECS Elementen ausgestattet war und somit ein Force-Feedback ermöglichte. Dafür integrierten sie flexible Sehnen, gefüllt mit ER Flüssigkeiten, die bei Bedarf einen steifen bzw. flexiblen Zustand einnahmen. Angebracht sollten diese Sehnen auf der dorsalen Seite der Finger. [Abbildung 13](#) veranschaulicht das Konzept des Memica Gloves.

Sofern eine elektrische Spannung angelegt wird, versteifen die Sehnen und fixieren somit die im Handschuh befindende Hand des Benutzers.

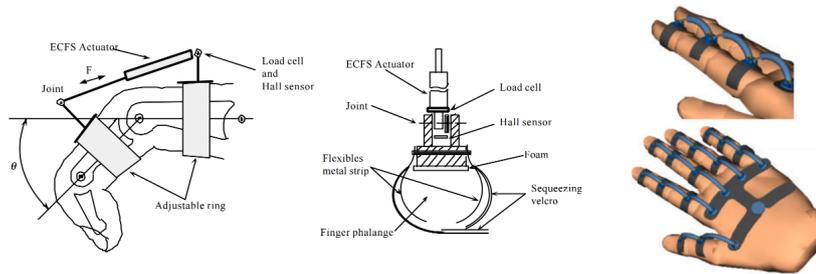


Abbildung 13: Memica Glove Konzept. Die Zeichnungen wurden aus [1] übernommen.

Die Reaktionszeit von ERFs ist im einstelligen Millisekunden Bereich, auch aus diesem Grund eignet sich diese Technologie für haptische Schnittstellen, vorrangig im Kontext der Mixed Reality, wenn Realität mit Virtualität verschmilzt, spielt die Latenz eine enorm große Rolle.

Bar-Cohen et al. identifizieren eine Schwierigkeit beim Umgang mit ERFs - die Tatsache, dass Hochspannung (2-5kV) erfordert wird um die Viskosität der Flüssigkeit zu ändern und diese in einem bestimmten Zustand zu halten. Dies führt zu zwei Konsequenzen. Zum einen ist die Komplexität des gesamten Systems durch das arbeiten mit Hochspannung, zum anderen erhöht es das Risiko für den Benutzer [1]. Heutzutage jedoch kann Hochspannung mit niedrigem Stromstärke transformiert werden, daher entfallen die Gefahren für den Entwickler sowie den Endnutzer [1]. Einen ähnlichen Ansatz wie der von Bar-Cohen et al. verfolgten Winter et al. mit ihrem MRAGES Glove [67]. Auch diese hatten Sehnen auf der dorsalen Seite der Finger befestigt, die mit intelligenter Flüssigkeit gefüllt waren. Statt ERF benutzten diese aber MRF, welches im Magnetfeld den festen Zustand annahm und somit die Hand im Handschuh fixierte. Wie bei MEMICA Glove ging der taktile Reiz auf die Fingerkuppen nur indirekt von der Flüssigkeit aus, sondern in beiden Fällen von dem Stoff des Handschuhs.

Haptic Black Box

Im Jahr 2007 haben Sgambelluri et al. von der Universität Pisa eine haptische Schnittstelle unter Verwendung von magnetorheologischer Flüssigkeit vorgestellt - die Haptic Black Box.

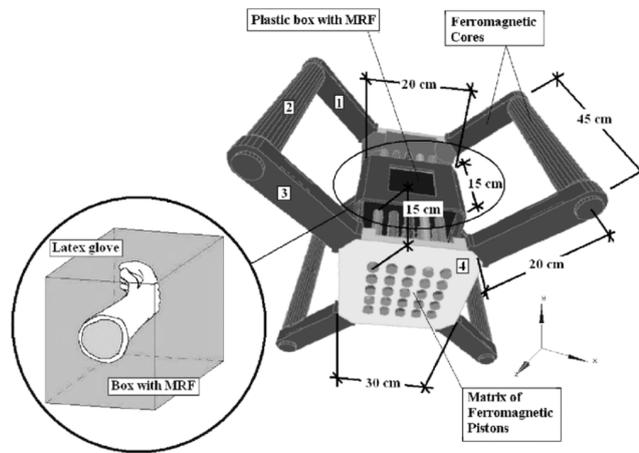


Abbildung 14: Architektur der Haptic Black Box von Sgambelluri et al. [54]

Das Herzstück ist eine Kiste aus Kunststoff mit den Maßen 20 x 20 x 15cm, in der sich eine magnetorheologische Flüssigkeit befindet. Verwendet wird eine kommerzielle Flüssigkeit mit dem Namen MRF132LD welche von der Firma Lord Corporation vertrieben wird. Um dem Benutzer Handgesten innerhalb dieser Box zu ermöglichen wird ein Latexhandschuh in Richtung der Innenseite befestigt. Ausserhalb der Kiste befindet sich die Apparatur mit 16 (4 x 4) elektromagnetischen Kernen, die einzeln angesteuert werden können. Durch das Ansteuern der Magnete mit unterschiedlichen Intensitäten wird die Flüssigkeit innerhalb der Box partiell, im Bereich des Magnetfelds, fest. Dies lässt den Benutzer beliebige Objekte innerhalb dieser Box ertasten [54].

Da man durch unterschiedliche Magnetstärken vielfältige Viskositäten der in der Box befindenden MRF erzeugen kann, können Weichheit bzw. Härte simuliert werden.

Im Zuge der Recherche zu taktilem Feedback durch intelligente Flüssigkeiten, wurde lediglich diese Arbeit von Sgambelluri et al. identifiziert. Der zuvor vorgestellte Ansatz konzentrierte sich auf die das Force-Feedback und fällt somit in das kinästhetische Feedback.

MudPad

Borchers et al. von der RWTH Aachen haben im Jahr 2010 ebenfalls eine haptische Schnittstelle mit magnetorheologischer Flüssigkeit realisiert. Das MudPad [27] ist ein Touch-Bildschirm, der in der Lage ist ein taktiles Feedback an unterschiedlichen Stellen des Bildschirms zu geben. Wenn man heutzutage von haptischem Feedback bei Bild-

schirmen spricht, so handelt es sich dabei lediglich um kurze Vibration bei Berührung des Bildschirms. Meist ist lediglich ein einziger Vibrationsmotor im Bildschirm, bspw. Smartphone, verbaut. Ein lokalisiertes Feedback an unterschiedlichen Stellen ist daher nicht möglich. Das MudPad hingegen kann an unterschiedlichen Stellen des Bildschirms verschiedene Druckeigenschaften gestatten. Bewerkstelligt ist dies durch den vielschichtigen Aufbau des Bildschirms. Auf der linken Seite der [Abbildung 15](#) sind vier Ebenen illustriert.

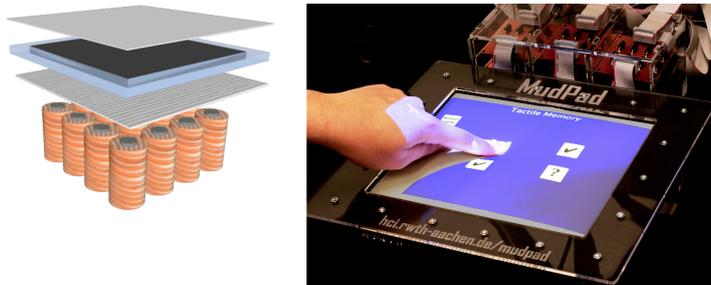


Abbildung 15: Konzeptskizze (links) und Aufbau des MudPad Displays (rechts). Die Bilder sind aus [27] übernommen.

Die Grundebene bildet eine rechteckige Anordnung von Elektromagneten, die individuell angesteuert werden können, um Magnetfelder zu erzeugen. Die Elektromagnete müssen stark genug sein um das MRF zu beeinflussen, sodass jeder einzelne Magnet relativ groß ist (\varnothing 2cm) und dadurch die Auflösung des taktilen Feedbacks (12 x 7 Magnete bei einem 10" Tablet) relativ niedrig ist.

Die darauffolgende resistive Ebene ist für die Toucheingaben verantwortlich. Es handelt sich um eine berührungsempfindliche Oberfläche, die Druckeingaben identifizieren kann.

Darüber ist eine mit MRF gefüllte, etwa 3-5mm dicke Hülle platziert. Diese reagiert auf die unterschiedlichen Magnetfelder aus der untersten Ebene und kann somit stellenweise versteifen oder weich sein.

Die oberste Ebene ist eine Latexoberfläche, die als Projektionsfläche der grafischen Schnittstelle dient. Borchers et al. wählen eine Projektion von oben, da das MRF aus Eisenspänen zusammengesetzt ist und diese lichtundurchlässig sind. Wünschenswert wäre eine Rückprojektion, jedoch ist ein lichtdurchlässiges MRF nach Informationen von Borchers et al. nicht verfügbar.

Das besondere an MudPad sind die unterschiedlichen Druckstärken, die das System dem Benutzer durch den Einsatz von MRF und den individuell anzusteuernenden Elektromagnete bietet. Somit kann der Benutzer unterschiedliche Texturen bzw. eine Topographie am Bildschirm taktil wahrnehmen.

Erste Schemata bzw. Richtlinien zur Gestaltung von Benutzerschnittstellen mit dieser Art von taktilen Feedback wurden von Borchers et al. definiert. Ein fester Flüssigkeitsstatus eignet sich somit für inakti-

Magnet Signal	Fluid State	UI Mapping (System View)	UI Mapping (User View)
	stiff	inactive areas, i.e., no user input possible	prevent interaction
	quick on/off transition	active UI elements, e.g., buttons	acknowledge user input
	(rapidly) changing vibrating	active areas, demanding user attention	communicate system processes, e.g., progress bar
	fluid	active areas, allow interaction	neutral

Abbildung 16: Definierte Schemata für bestimmte Flüssigkeitszustände. Übernommen aus der MudPad Arbeit [27].

ve Bereiche des Bildschirms. Bereiche bei denen keinerlei Interaktion seitens des Benutzers gewünscht ist, bspw. ein OK-Button bei Bestätigungsdialogen im Zuge eines Löschvorgangs. Pulsierende Flüssigkeit kann auf interaktive Bereiche des Bildschirms aufmerksam machen oder einen fühlbare Fortschrittsbalken darstellen.

AIREAL

Sodhi et al. von Disney Research stellten im Jahr 2013 eine Möglichkeit vor, taktile Wahrnehmungen eines Benutzers durch den Einsatz von Luftdruck zu fördern. Auch hier handelt es sich um einen Ansatz, der es dem Benutzer ermöglicht ohne das Tragen von zusätzlichen Geräten taktiles Feedback in der Luft zu empfinden. Im Gegensatz zu VacuumTouch [19] werden bei AIREAL [56] Luftströme angesaugt, sondern ausgestoßen. Beim gewöhnlichen Ausstoßen entsteht eine kegelförmige Ausbreitung der Luft, um jedoch den Luftstrom auf einen Punkt zu konzentrieren, entwickelte man ein Gerät zum Ausstoßen von Luftwirbeln. Luftwirbel eignen sich hierfür besonders gut, da sie über eine lange Zeit ihre Größe und Form halten können.

Abbildung 17 veranschaulicht das Gerät, welches mit Hilfe von Motoren Neigungs- und Schwenkwinkel bedienen kann. Wie eine kleine Luftkanone ist hier eine transparente Düse zu sehen, die durch Blenden mit unterschiedlichen Durchmessern versehen wird.

In einem Performancetest wollte man AIREAL auf die Genauigkeit sowie die grundlegende Leistungsfähigkeit testen. Hierfür wählte man sieben unterschiedliche Blenden aus um zu bestimmen welcher Durchmesser und welche Form der Luftwirbel am effizientesten sind. Die ausgestoßenen Luftwirbel hatten selbst bei einer Distanz von 1.25 Metern eine Zielgenauigkeit von 84%. Bei 75cm Distanz sogar eine Genauigkeit von 98%. Der Blendendurchmesser, der zuständig ist für die Größe der Luftwirbel, sowie letztlich den Fokusspot

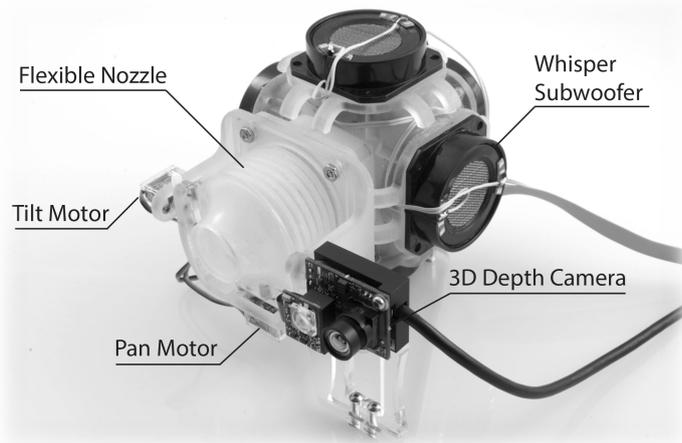


Abbildung 17: AIREAL Generator [56]

der taktilen Reizung ausmacht, darf nicht zu klein, aber auch nicht zu groß sein und ist am performantesten bei 2,3cm. [Abbildung 18](#) zeigt AIREAL im Einsatz,

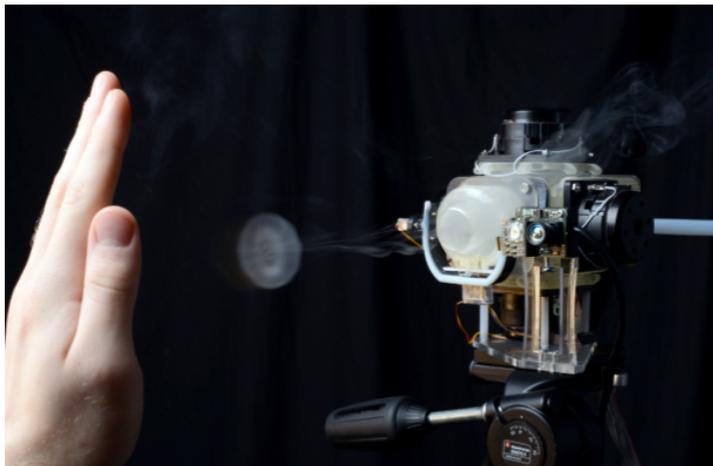


Abbildung 18: AIREAL in Aktion (mit Rauch zur Visualisierung) [56]

Der Druck, den ein Luftwirbel auf der Haut auslöst wurde im Durchschnitt bei $0.5\text{gf}/\text{cm}^2$ gemessen. Die Latenzzeit zwischen unterschiedlichen Fokussen beträgt im Durchschnitt 139ms.

Die Eigenschaften der Luftwirbel basieren auf unterschiedlichen Dimensionen, die Sodhi et al. vorab definierten. Um eine bestimmte taktile Reizung hervorzurufen spielten die Pulsfrequenz, die Intensität, die Winkellage sowie die Vielfachheit eine Rolle. Die Intensität ist bspw. zuständig für die Druckstärke, sowie die Größe und die Distanz der jeweiligen Luftwirbel. Da der Einsatz von Systemen, die ein haptisches Feedback in freier Luft erzeugen ziemlich vielfältig ist, wurden zusätzlich folgende fünf Designprinzipien bestimmt:

- a) *Collocation*

- Das visuelle sowie das taktile Feedback müssen örtliche, sowie zeitlich übereinstimmen, z.B. sofern die Hand ein visuell dargestelltes Objekt schneidet, muss die Reizung genau auf diesem Schnittpunkt erzeugt werden.

b) *Persistence*

- Der Reiz darf nicht nur temporär sein, sondern muss wie bei realen Objekten, die man bspw. in die Hand nimmt andauern.

c) *Variance*

- Um Texturen von virtuellen Objekten zu unterscheiden, müssen unterschiedliche Reizintensitäten angeboten werden.

d) *Continuity*

- Haptisches Feedback sollte auch bei flüssigen Bewegungen ununterbrochen fühlbar sein.

e) *Transience*

- Haptik mitten in der Luft kann physische Objekte aus der Umgebung des Benutzers miteinbeziehen.

Es wurden unterschiedliche Demo-Anwendungen entwickelt, die sich mindestens an eins der oben aufgelisteten Designprinzipien richten. Eine Anwendung, die das visuelle mit dem haptischen Feedback vereint ist das ‚Haptic projection‘ (Abbildung 19). Angelehnt an die Konzepte des Office of the future [51] oder auch die Augmented Surfaces [53] von Rekimoto et al. wird ein fliegender Schmetterling in die Luft projiziert. Sobald der Benutzer seinen Arm zur Projektion ausrichtet und der Schmetterling quasi auf seine Haut projiziert wird, wird ein haptischer Reiz ausgelöst. So kann der Benutzer das Flattern der Schmetterlingsflügel spüren. In dieser Anwendung sind offensichtlich die Prinzipien der Collocation und des Transience eingehalten worden.

Eine weitere interessante Anwendung setzt das Designprinzip Continuity, sowie Variance um, in dem es dem Benutzer das Erfühlen von unterschiedlichen Texturen ermöglicht. Hierfür wurde eine 3D-Landschaft aus einem Spiel ausgewählt, die Materialien wie Gras, Steine, Holz und Wasser beinhaltet. Die Anwendung wurde auf einem Microsoft PixelSense tabletop ausgeführt. Der Benutzer sollte mit einer Wischgeste über das Terrain schwenken und bekam durch das unter der Hand positionierte AIREAL Gerät taktile Reize in unterschiedlichen Intensitäten.

Diese und drei weitere Anwendungen wurden von 27 Probanden für ca. 5-10 Minuten getestet. Das daraufhin erfragte verbale Feedback war durchweg positiv. Die taktilen Reize empfanden besonders bei der Projektion des Schmetterlings viele als real.



Abbildung 19: Projektion. AIREAL Demo-Anwendung [56]

Neben der relativ hohen Latenzzeit zwischen dem Wechsel von unterschiedlichen Fokussen, nennen Sodhi et al. noch weitere zwei Limitierungen. Zum einen erzeugt die AIREAL Vorrichtung einen hörbaren Ton, den die Benutzer als störend wahrnehmen könnten. Dies liegt vor allem an den verbauten Motoren, die für die Neigung der Düse zuständig sind. Des Weiteren benötigt AIREAL eine aktive Kalibrierung und Installation bevor es verwendet werden kann, bspw. wurden bei allen Tests Stative benutzt auf denen das AIREAL Gerät angebracht war. Auch die genaue Position muss spezifisch für jede Anwendung ausgesucht werden, da das Gerät nur einen beschränkten Blickwinkel erreicht. Man geht jedoch davon aus, dass die Akzeptanz der Benutzer gewonnen werden kann, wenn man bei Produkten aus der Unterhaltungselektronik die Hardware versteckt verbaut, sodass die Vorrichtung erst gar nicht sichtbar ist.

Es ist ein vielversprechender Ansatz, der die physikalischen Erkenntnisse der Strömungslehre sehr gut in den Human-Computer Interaction Kontext integriert. Das taktile Feedback wurde von den Benutzern als sehr hilfreich angenommen und man kann sich vorstellen, dass diese Technologie speziell in VR-Anwendungen eine wesentliche Rolle zur Generierung von realer Atmosphäre spielen wird. Um jedoch computergenerierte Objekte für einen Benutzer greifbar zu machen und auch taktile Reize an einzelne Finger zu senden müssen noch einige Anpassungen getan werden. Die Intensität des Druckes ist mit $0,0005 \text{ kg/cm}^2$ zu gering um ein reales Fassen von Objekten zu simulieren.

UltraHaptics [7] ist ein von Subramanian et al. entwickeltes System zur Generierung von haptischem Feedback mitten in der Luft. Die zugrunde liegende Methode ist das gezielte Aussenden von Ultraschallwellen auf die zuvor identifizierten Fingerspitzen. Dieser An-

UltraHaptics

satz bedient sich dem seit den 1850er Jahren bekannten physikalischen Phänomen der Schallstrahlungskraft. Durch Einsatz von mehreren Ultraschall-Lautsprechern überlagert man den Schallstrahlungsdruck und erzeugt somit gezielte Zonen in einem dreidimensionalen Raum. Der erhöhte Druck in der Luft ermöglicht dadurch eine taktile Reizung der Haut. Dieser Effekt ist bereits 1977 von Gavrilov et al. dokumentiert worden [16], doch durch die Möglichkeit des Trackings von Händen und folglich dieser Kombination entsteht nun ein neuer Anwendungsfall für den Bereich Human-Computer Interaction.

Eines der Ziele von UltraHaptics war es ein System zu entwickeln, welches dem Benutzer eine einfache Interaktion ermöglicht ohne vorhergehende Anweisungen geben zu müssen. Es sollte ein kompaktes System entstehen, welches zum einen durch einen Display virtuelle Objekte darstellen und zum anderen diese Objekte haptisch erfühlbar machen kann. Zur Erzeugung des haptischen Feedbacks, bzw. den spürbaren Druck in der Luft durch Überblendung der Schallstrahlungskraft, wurden 320 Ultraschall-Lautsprecher in einem rechteckigen Raster aufgereiht.

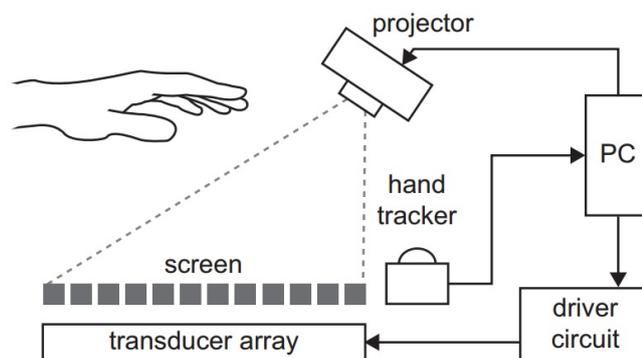


Abbildung 20: Aufbau des UltraHaptics System [7]

Man sieht auf der [Abbildung 20](#), dass unmittelbar über diesen verbauten Lautsprechern eine Projektionsfläche angebracht ist auf die durch einen Beamer virtuelle Objekte projiziert werden können. Um das haptische Feedback unmittelbar über der Projektionsfläche zu ermöglichen, musste das Display-Material die Schallwellen durchlassen können. Hierfür orientierte man sich an den Leinwänden der Kinos, die sich ebenfalls dieser Herausforderung gestellt sehen, da man Lautsprechersysteme oftmals auch hinter der Kinoleinwand positioniert um eine ansprechende Akustik zu gewährleisten. Das Erfassen der Handbewegungen wurde durch eine LeapMotion bewerkstelligt, die direkt neben dem Display installiert und an den PC angeschlossen wurde.

Der taktile Reiz wird über einen Luftdruck erzeugt und beläuft sich, bei einer Distanz von 20cm von den Händen zum Display, auf höchstens 257 Pascal, was ca. $2.6\text{g}/\text{cm}^2$ entspricht. Auch wenn der

Druck ziemlich gering erscheint, so haben die Studien gezeigt, dass 7 der 9 Probanden die projizierten Punkte zu 100% ertasten konnten und die Restlichen zu 87% die Punkte identifiziert haben. Die Aufgabenstellung beinhaltete das Ertasten und Bestimmen von Punkten in der Luft. Projiziert wurden Punkte mit unterschiedlichen und identischen Frequenzen. Die Probanden konnten zwei Punkte mit unterschiedlichen Frequenzen besser voneinander unterscheiden als zwei Punkte mit gleicher Frequenz. Diese Tatsache führte dazu, dass man eine weitere Studie gemacht hat um feststellen zu können ob Probanden zwei unterschiedliche Frequenzen in ihrer Haptik unterscheiden und dadurch identifizieren können. Es wurden wieder zwei Punkte projiziert mit jeweils unterschiedlicher Frequenz. Festgestellt wurde, dass nach zehnminütiger Eingewöhnungsphase die Wahrscheinlichkeit die korrekten Frequenzen zu identifizieren von 50% auf 88% gestiegen ist.

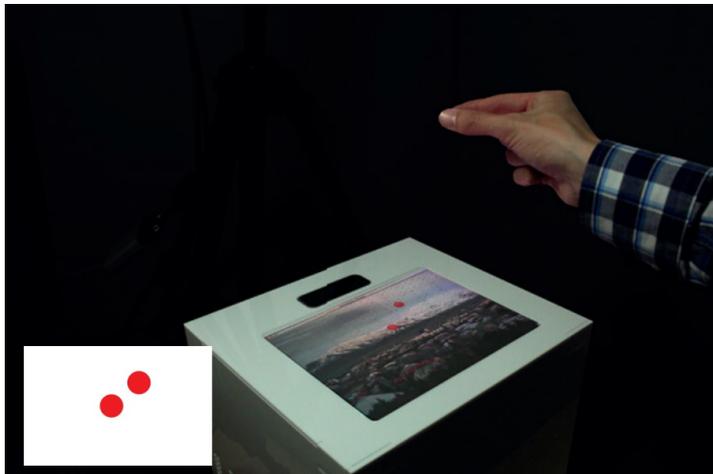


Abbildung 21: Anwendungsfall Pinch-to-Zoom bei UltraHaptics System [7]

Basierend auf den Erkenntnissen durch die Studie wurden mehrere Anwendungsfälle entworfen. Einer davon ist bspw. das Umsetzen der Pinch-to-Zoom Geste, bei der man den Zeigefinger und den Daumen entweder zusammenführt oder auseinanderführt um ein dargestelltes Foto zu verkleinern oder zu vergrößern. Auf der Abbildung [Abbildung 21](#) wird deutlich, dass die Fokuspunkte, die das taktile Feedback erzeugen, identischen Frequenzen ausgesetzt sind und daher sich gleich anfühlen. Sobald der Benutzer den Daumen und den Zeigefinger voneinander spreizt, folgen die Fokuspunkte in der Luft der Position der Fingerkuppen. Zusätzlich ändert sich gleichzeitig die Frequenz dieser Fokuspunkte parallel zu dem Zoomverhältnis des Fotos, sodass der Benutzer nicht nur visuell sondern auch haptisch eine Veränderung durch seine Interaktion wahrnimmt. Bei einer weiteren Anwendung handelt es sich um einen Audioplayer, bei dem man ein Musikstück durch das Betätigen eines Buttons entweder Abspielen oder Pausieren kann. Darüber hinaus gibt es einen Schiebe-

regler zur Steuerung der Lautstärke des Musikstücks. Die einzelnen Fokuspunkte unterscheiden sich in ihrer Frequenz, sodass der Benutzer diese eindeutig unterscheiden kann. Der Abspielbutton hat eine höhere Intensität als der Regler, ausserdem bleibt der Fokuspunkt des Buttons immer statisch auf einer Stelle in der Luft, während der Fokuspunkt des Schiebereglers, abhängig von der Interaktion des Benutzers, seine Position ändert und diese dem Benutzer durch taktilen Feedback vermittelt. Besonders geeignet ist dieses taktile Feedback in einem Kontext bei dem der visuelle Kontakt zum Display nicht durchgehend gegeben ist, bspw. während einer Autofahrt.

GloveOne

Eine weitere Lösung, welche ein kommerzielles Ziel verfolgt, ist das von der spanischen Firma NeuroDigital Technologies² bereits im Jahr 2014 als erfolgreiches Crowdfunding Projekt vorgestellter Handschuh namens GloveOne³. Es handelt sich bei GloveOne um Handschuhe, die durch Vibration ein taktilen Feedback geben. In jedem Handschuh sind 10 Knopf-Vibrationsmotoren verbaut. Pro Fingerkuppe einer, sowie fünf weitere auf der Handinnenfläche (*Abbildung 22*). Angesteuert werden diese Vibrationsmotoren durch einen Controller, der wiederum via Bluetooth 4.0 mit der eigenen Software kommuniziert. Explizit für Anwendungen in der VR entwickelt, wurde der Handschuh im Jahr 2016 auf den großen Konsumententmessen, wie der Consumer Electronics Show in Las Vegas oder der GamesCom in Köln, mit den VR-Brillen OculusRift aber auch der HTC Vive von Interessierten Besuchern getestet. Das Handtracking erfolgt beim GloveOne durch eine 9-Achsen Motion-Einheit, die ebenfalls in jedem Handschuh verbaut ist. Um den Kabelwirrwarr zu umgehen wurde ebenfalls ein Lithium-Polymer-Akku verbaut, der eine achtstündige Laufzeit gewährleistet. Da die Synchronität zwischen dem Berühren eines virtuellen Objekts und dem taktilen Feedback extrem wichtig ist um die Stimulation realistisch wahrzunehmen, können die Handschuhe auch mit einem Kabel verbunden werden. Laut Lederman und Jones sollte die Stimulation und das Berühren eines Gegenstands 30-40ms nicht überschreiten um als kohärent wahrgenommen zu werden [28]. Die Latenz beim GloveOne ist mit ca. 28ms via Bluetooth und 21ms via Kabel daher im zufriedenstellenden Rahmen.

Laut Hersteller können die verbauten Vibrationsmotoren einen realistischen Druck simulieren, jedoch wird aus den veröffentlichten Dokumentationen nicht klar mit welcher Frequenz diese Vibrationen angesteuert werden, sodass dieses Versprechen nicht als glaubwürdig einzustufen ist. Die integrierte Bewegungserkennung ist im Ge-

² <https://www.neurodigital.es/> abgerufen am 09.09.2016

³ <https://www.neurodigital.es/gloveone/> abgerufen am 09.09.2016



Abbildung 22: GloveOne Handschuhe und die Verteilung der Vibrationsmotoren [17]

gensatz zu optischen Verfahren der Gestenerkennung fehlerfreier, da schlicht weniger Störfaktoren auftreten. Nicht desto trotz wird in der zweiten Version des GloveOne, dem AvatarVR, welcher seit dem 3. Quartal 2016 angeboten wird, zum Tracken der Hände ein zusätzliches Armband mitgeliefert. Das lässt darauf schließen, dass die Motion-Einheit allein nicht ausreichend ist. Bei der zweiten Version des Handschuhs wird des Weiteren auf die Hygiene geachtet und ein bakteriell resistenter Stoff verwendet. Sogar das Waschen des Handschuhs wird durch wasserdicht verbaute Elektronik ermöglicht. Alles in allem, handelt es sich beim GloveOne und seinem Nachfolger AvatarVR um einen vielversprechenden Ansatz des taktilen Feedbacks, der vor allem die Entwicklung der Spielindustrie weiter im Bezug auf taktilen Feedback prägen wird. Einen realistischen Druck auf die Fingerkuppen werden jedoch die Vibrationsmotoren nicht erzeugen können, da diese von Menschen immerfort als Vibration wahrgenommen werden. Nicht desto trotz eignet sich dieser Ansatz, im Bezug auf diese Masterarbeit, am meisten für das veredeln von Greifgesten durch Haptik in der Mixed Reality.

Im 4. Quartal 2016 stellte Microsoft Research auf der UIST Konferenz ihre Controller NormalTouch [2] und TextureTouch [2] vor. Auch wenn der Ansatz von Benko et al. durch den Einsatz eines Controllers, welcher adaptiert ist von den aktuellen kommerziellen Lösungen, wie z.B. der HTC Vive Controllern oder den Oculus Rift Touch Controllern, so ermöglicht dieser einen dynamischen taktilen Druck auf die Fingerkuppen. Der NormalTouch Controller ist mit ei-

NormalTouch

ner kleinen Plattform versehen, auf die der Zeigefinger platziert werden kann. Abhängig von der virtuellen Welt kann die Plattform, abhängig von der Position der Hand innerhalb der VR die VR-Oberfläche rendern. Die Plattform wird durch Servomotoren gesteuert und kann dadurch unterschiedliche Neigungswinkel annehmen und bis zu 2.6cm ausgefahren werden. Virtuelle Objekte können somit ertastbar gemacht werden. Auch unterschiedliche Weichheitsgrade kann NormalTouch rendern. Der Benutzer kann quasi bis zu 2.6cm in die Tiefe drücken, abhängig von dem dynamischen Widerstand, den der Controller durch die Motoren festsetzt.

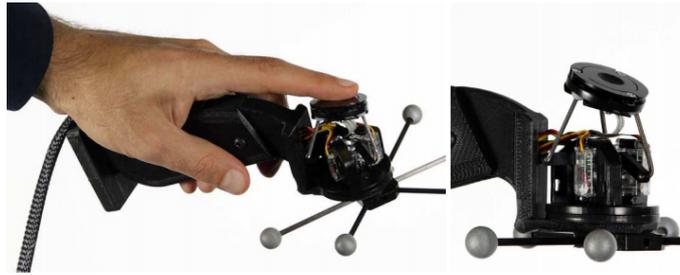


Abbildung 23: NormalTouch Controller mit neigungsfähiger Plattform [2]

TextureTouch

Der ‚TextureTouch‘ Controller, wie der Name schon verrät, ermöglicht nicht nur die Wahrnehmung der Form von Objekten in der VR, sondern lässt den Benutzer auch unterschiedliche Texturen erfühlen. Wie auch beim NormalTouch Controller befinden sich beim TextureTouch Controller am oberen Ende des Controllers 16 (4x4) ausfahrbare Stifte, die im eingefahrenen Zustand einer Plattform ähneln. Jeder dieser einzelnen Stifte wird durch einen Servomotor angesteuert und kann seine Y-Position verändern. Auch wenn die Auflösung von 4x4 Stiften relativ niedrig ist, ist der Ansatz sehr vielversprechend um Texturen der virtuellen Welt Benutzern erfahrbar zu machen.

Auf die Probe gestellt wurden die beiden Controller innerhalb einer Studie von Microsoft Research. Zu den Aufgaben der 12 Teilnehmer zählten neben dem typischen Targeting (Erzielen von Objekten in der VR) und Tracing (Pfade nachfahren) auch die individuelle taktilen Wahrnehmung von VR-Objekten und natürlich die Ausführungsdauer der einzelnen Durchführungen. Teilnehmer haben die Aufgaben mit vier unterschiedlichen Aufbauten durchgeführt. Das Tracing und Targeting wurde mit unterschiedlich großen virtuellen Objekten vollzogen, getreu dem Fitts,schen Gesetz [37]. In vier Gruppen, jeweils mit den Controllern NormalTouch und TextureTouch, einer Vorrichtung, die Vibrationen auf die Fingerkuppe auslöst und vollkommen ohne taktilen Reiz, wurden die Aufgaben bewerkstelligt, um Unterschiede zu identifizieren. Es wurde festgestellt, dass Probanden höhere Fehlerraten erzielten wenn keinerlei haptisches Feedback gegeben wurde. Ein signifikanter Unterschied wurde sogar zwischen den Druck gebenden Vorrichtungen und der Vibrationsvorrichtung fest-

gestellt. Probanden können somit mit Hilfe von Druck akkurater Objekte erzielen bzw. erfassen [2], als mit Vibration.

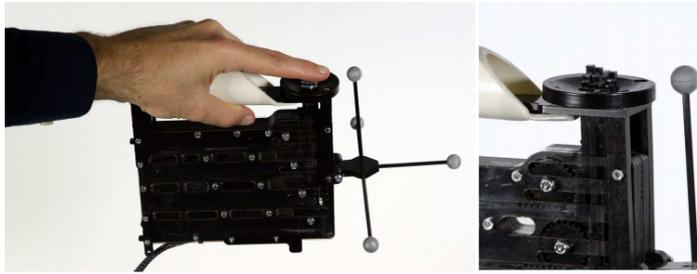


Abbildung 24: TextureTouch Controller mit 16 ausfahrbaren Stiften zur Simulation von virtuellen Texturen [2]

Sowohl NormalTouch als auch TextureTouch sind aufgrund des Einsatzes von einer Vielzahl an Servomotoren ziemlich laut und könnten als störend wahrgenommen werden. Im TextureTouch verbergen sich 16 Motoren, die das Gesamtgewicht dieses Controllers auf 600g heben.

Das Studiensetting von NormalTouch eignet sich hervorragend für die Performancetests von FluidHaptics und wurde somit mit Rücksprache von Microsoft Research in dieser Arbeit adaptiert. Es wird somit versucht eine einheitliche Vergleichsmöglichkeit im Kontext der haptischen Geräte innerhalb MR-Anwendungen zu etablieren.

3.3 ZUSAMMENFASSUNG

Der Schwerpunkt bei den vorgestellten Arbeiten lag darin taktile Reize auf Hände bzw. Finger auszuüben.

Der Mehrwert durch Haptik ist in den vorgestellten Arbeiten bisher wenig dokumentiert. Die entwickelten Anwendungen finden bei den Probanden zwar überaus hohen Anklang, jedoch wäre eine Ausarbeitung von Methoden zur Evaluierung von Interaktionen mit haptischen Feedback sehr hilfreich. Denn grundsätzlich zeigen sämtliche vorangegangene Arbeiten, dass haptisches Feedback das räumliche Gedächtnis fördert, die Präzision, Effizienz und Wahrnehmung erhöht und auch die Benutzererfahrung steigert [2, 20, 44, 45, 47, 57]. Einzig die Arbeit von Microsoft Research versucht einen Standard zu definieren, um haptische Systeme in VR Umgebungen nach Präzision und Effizienz einheitlich zu testen.

Wesentliche technische Eigenschaften für das Rendern von taktilem Reize sind die Fokusgröße, bzw. die Flächen, die für den taktilen Reiz vorgesehen ist. Darüber hinaus ist die Druckstärke von Relevanz sowie die Geschwindigkeit der Umschaltzeit von einer bestimmten Stärke zu einer anderen. [Tabelle 3](#) fasst diese Daten der begutachteten Arbeiten zusammen. Die maximale Größe des Fokusspots ist

dabei beschränkt auf eine Zeigefingerkuppe, die auf 15-35mm Durchmesser bemessen wird.

	Typ	Spot	Wechsel	Druckstärke
MEMICA Glove [1]	SF	-	<10ms	?
Haptic Black Box [54]	SF	15-35mm	<10ms	>0.5kg/cm ²
MudPad [27]	SF	15-35mm	<10ms	>0.5kg/cm ²
AIREAL [56]	LD	16.5-25mm	139ms	0.0005kg/cm ²
UltraHaptics [7]	US	2-5mm	4ms	0.0026kg/cm ²
GloveOne [17]	V	8mm	22-28ms	-
NormalTouch [2]	FF	33mm	50-100ms	?
TextureTouch [2]	FF	13mm	50-100ms	?

Tabelle 3: Vergleich ausgewählter Arbeiten auf technische Eigenschaften, wie die Geschwindigkeit der Fokuswechsel, der Druckstärke sowie der Größe des Fokusspots. Die Technologien sind gegliedert in SF=Smartfluids, LD=Luftdruck, US=Ultraschall, V=Vibration und FF=Forcefeedback. (? = unbekannt, - = nicht unterstützt)

Die Haptic Black Box [54] sowie das MudPad von Jansen et al. [27] bieten den höchsten Druck, jedoch muss man festhalten, dass der Druck nicht während einer freien Bewegung in der Luft sondern in einer festen Benutzerschnittstelle ausgelöst wird. Bei MudPad muss der Benutzer auf einen Bildschirm drücken und bei Haptic Black Box wird lediglich die Masse in der sich die Hand befindet innerhalb wenigen Millisekunden hart. Der Bewegungsspielraum ist hierbei auf die Größe der Box begrenzt (20x20x15cm).

Weder bei NormalTouch noch bei TextureTouch gehen die Autoren auf die Druckstärke ein. In den Videos sowie in der Beschreibung lässt sich erkennen, dass zumindest bei NormalTouch der Benutzer seinen Zeigefinger auf der Plattform herunterdrücken kann, jedoch wird nicht ersichtlich mit welcher Stärke der Gegendruck durch die Plattform simuliert werden kann.

Die Umschaltgeschwindigkeit der Druckstärken ist bei allen Systemen in einem akzeptablen Rahmen um die visuelle Kohärenz zu bedienen. Ausschließlich AIREAL [56] ist mit einer Wechseldauer von 139ms zu langsam um dem Benutzer einen realistischen Eindruck zu vermitteln. Diese Schwäche könnte durch Interpolation softwaremäßig behoben werden, in dem man die zu reizende Position innerhalb des Raums vorausberechnet.

Die Wahrnehmung von Objekten in der realen Welt ist an unterschiedliche Faktoren gebunden. Wie ein Objekt taktil erkannt wird, hängt von der Textur, Größe, Härte, Gewicht, Temperatur und natürlich der Form ab [35]. All jene Eigenschaften gilt es in der virtuellen Welt zu simulieren um ein möglichst hochgradiges Immersionslevel

anzustreben. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick der analysierten Arbeiten und stellt diese den Eigenschaften zur Wahrnehmung von Objekten gegenüber (Tabelle 4).

	Form	Größe	Gewicht	Härte	Temperatur	Textur
MEMICA Glove [1]	X	✓	X	X	X	X
Haptic Black Box [54]	✓	✓	✓	✓	X	X
MudPad [27]	X	X	X	✓	X	✓
AIREAL [56]	X	X	X	X	X	X
UltraHaptics [7]	X	✓	X	X	X	X
GloveOne [17]	X	✓	✓	X	X	X
NormalTouch [2]	✓	✓	X	✓	X	X
TextureTouch [2]	X	✓	X	✓	X	✓

Tabelle 4: Gegenüberstellung der Arbeiten zu Objekteigenschaften, die beim Berühren bzw. Ertasten von Objekten wahrgenommen werden können (✓ = wird unterstützt, X = wird nicht unterstützt)

Aus dieser Gegenüberstellung lässt sich interpretieren, welche Systeme für Greifinteraktionen geeignet sind und welche weitestgehend ausgeschlossen sind. AIREAL [56] ist bspw. überhaupt nicht geeignet für Greifinteraktionen, weil diese Technologie keines der sechs Eigenschaften, zur Wahrnehmung von Objekten, bedienen kann. Haptic Black Box [54] hingegen, unterstützt wesentliche Faktoren zur Erkennung von Objekten. Anhand von diesen beiden Arbeiten lässt sich erkennen, dass es eine enorme Herausforderung ist, Greifinteraktionen in Mixed Reality durch taktile Reize zu veredeln. Haptic Black Box ist sehr klobig und kann von dem Benutzer nur statisch angewendet werden. Es ist festzustellen, dass je leichter die Anbauten auf der Hand sind, desto weniger unterstützen diese Systeme das Greifen. Die Lösungen von Microsoft Research NormalTouch [2] und TextureTouch [2] schaffen den besten Kompromiss, in dem sie wesentliche Faktoren zur Objektidentifikation ermöglichen, dabei die Größe der Anbauten die kritische Grenze nicht überschreitet, da sie die bereits etablierte Controllergrößen adaptieren.

Wir betrachten nun die ausgewählten Arbeiten erneut im Kontext dieser Masterthesis und stellen diese den definierten Anforderungen gegenüber.

Die Haptic Black Box von Sgambelluri et al. [54] ist mit ihren Eigenschaften am nächsten an den definierten Anforderungen. Durch den Einsatz von magnetorheologischen Flüssigkeiten ist die Haptic Black Box im Stande flüssige Übergänge beim Druck zu generieren. Ein großes Manko dieses Systems ist der eingeschränkte Interaktions-

	Gestenerkennung	Härte- / Weichheitsgrade	Visuelle Kohärenz	Greifinteraktion	Freie Interaktion
MEMICA Glove [1]	X	X	-	✓	✓
Haptic Black Box [54]	✓	✓	✓	✓	X
MudPad [27]	X	X	✓	X	X
AIREAL [56]	X	X	X	X	✓
UltraHaptics [7]	✓	X	✓	X	✓
GloveOne [17]	✓	X	✓	✓	✓
NormalTouch [2]	✓	✓	✓	X	✓
TextureTouch [2]	✓	X	✓	X	✓

Tabelle 5: Gegenüberstellung der analysierten Arbeiten zu den eingangs definierten Anforderungen (??) an Systeme zur Generierung von realitätsnahen taktilen Reizen bei Greifinteraktionen (✓ = wird erfüllt, X = wird nicht erfüllt)

raum, der mit 20x20x15cm lediglich das Greifen der Hand ermöglicht, jedoch ein festgehaltenes Objekt nicht überführen lässt. Diese Einschränkung disqualifiziert das System in einer Virtuellen Welt, da das Manipulieren der Position einen wichtigen Faktor darstellt.

Die Lösung von Microsoft Research mit NormalTouch und TextureTouch [2] ist ebenfalls sehr nah an den Anforderungen. Jedoch lassen diese aufgrund ihrer Umsetzung in Form eines Controllers keine richtigen Greifbewegungen zu.

Es hat sich gezeigt, dass Greifinteraktionen lediglich mit Systemen ermöglicht werden, bei denen Handschuhe verwendet wurden. Sowohl MEMICA Glove als auch GloveOne lassen dem Benutzer den Freiraum innerhalb eines virtuellen Raumes großzügig zu interagieren. Ein realistisches Greifen von Objekten wird durch unterschiedliche Härte- und Weichheitsgrade verstärkt, dies jedoch wird ausschließlich von der Haptic Black Box bedient, die mit ihrem komplexen und vorallendingen statischen Aufbau keinerlei Manipulation der Position im Raum zulässt. Eine Integration der intelligenten Flüssigkeiten, mit all ihren Eigenschaften, in einen Handschuh, würde die Greifinteraktion innerhalb von Mixed Reality Anwendungen enorm aufwerten.

Teil II

FLUIDHAPTICS

In diesem zweiten großen Bereich wird auf die Entwicklung des Prototypen FluidHaptics eingegangen. Neben den 3D gedruckten physischen Bauteilen, wird auch die VR Anwendung beschrieben.

Der entwickelte Prototyp wird daraufhin in einer Nutzerstudie auf Präzision und Effizienz getestet. Die Ergebnisse werden zuletzt analysiert und Erkenntnisse daraus abgeleitet und im Fazit umfassend erläutert.

In diesem Kapitel wird neben der Konzeption und Umsetzung der FluidHaptics Fingerkuppe zusätzlich die Implementierung der VR-Anwendung sowie der Aufbau des Tracking Systems erläutert. Die iterative Entwicklung des FluidHaptics Handschuhs wurde im Juni 2016 gestartet und dauert vier Monate. In den folgenden Unterkapiteln werden die einzelnen Komponenten detailliert beschrieben.

4.1 FLUIDHAPTICS FINGERKUPPE

FluidHaptics Handschuhe verfügen über modulare Fingerkuppen, die in dieser Arbeit für maximal drei Finger einer Hand konzipiert wurden um einen Pinzettengriff in der VR vollziehen zu können. In den folgenden drei Unterkapiteln wird zuallererst die Zusammensetzung der magnetorheologischen Flüssigkeit beschrieben, danach wird auf die Konzeption und Modellierung der Fingerkuppen eingegangen und zuletzt der Microcontroller vorgestellt, der zur Ansteuerung der Fingerkuppen von den Werkstätten der Universität Konstanz umgesetzt wurde.

4.1.1 Magnetorheologische Flüssigkeit

Um unterschiedliche Härte- und Weichheitsgrade realisieren zu können, adaptierte man den Ansatz von der Arbeit von Sgambelluri et al. (Haptic Black Box) [54] und verwendete intelligente Flüssigkeiten um deren Viskosität-Eigenschaften zu nutzen. Nach Rücksprache mit den Fakultäten Physik und Chemie der Universität Konstanz entschied man sich für den Eigenbau einer magnetorheologischen Flüssigkeit. Die alternative elektrorheologische Flüssigkeit ist schwierig zu bekommen und ist im Vergleich zu MRF um ein Vielfaches teurer (Mindestabnahme 1 Liter = \$1.500 [55]).



Abbildung 25: Auf dem rechten Bild sieht man die magnetorheologische Flüssigkeit - eine Mischung aus Eisenpulver (links) und pflanzlichem Öl (mitte).

Die magnetorheologische Flüssigkeit hingegen lässt sich in ihrer einfachsten Form in Eigenregie mischen. Unter Verwendung von feinem Eisenpulver und reinem pflanzlichem Öl wurde in den ersten Schritten eine angenehme, gelartige Konsistenz im flüssigen Zustand erarbeitet. Das Eisenpulver verfügt über eine Partikelgröße von höchstens 90 µm und wurde im herkömmlichen Handel erworben. Das Öl wurde im Supermarkt gekauft.

Die Mischung für 20 ml MRF besteht aus 8 g Eisenpulver und 15 ml Öl. Nach einminütigem Rühren vermischen sich diese Stoffe zu einer gelartigen Flüssigkeit. Diese Flüssigkeit wurde mit einer Spritze in zuvor gefertigte Plastiktütchen gefüllt.

Die Kunststoffpads wurden aus feinem Zellophan gefertigt, welches eine Stärke von 0.09 mm aufweist. Die zuvor gemischte MRF wurde nun in die Pads eingespritzt und danach mit einem Schweißgerät zugeschweißt. Das Pad hat eine Dimension von 20x20 mm und fasst 0.8 ml magnetorheologische Flüssigkeit.

In Kontakt mit einem Magnetfeld erhärtet das Pad und bei verlassen des Magnetfelds verwandelt es sich im direktem weg in ihre gelartige Form. Diesen Effekt macht man sich bei der Generierung der Druckstärke zu Nutze.

4.1.2 Fingerkuppe

Die Konzeption der Fingerkuppe durchlief fünf Iterationen in denen nicht nur die Menge des MRF sondern auch die Ansteuerung der Elektromagnete und natürlich die Form eine wesentliche Rolle spielten. Auf der [Abbildung 26](#) sind vier Vorgängermodelle abgebildet.

Die ersten Versuche eines Fingeraufbaus wurden mit bloßen Händen modelliert. Hierzu wurde mit FIMO Modelliermasse¹ eine Negativform einer Zeigefingerkuppe geformt und in einer Mikrowelle erhitzt. In die erhärtete Form wurde Silikon gegossen und zum Trocknen 24 Stunden bei Raumtemperatur liegen gelassen. Die so entstandene Fingerkuppe wurde mit der selbst gemischten magnetorheologischen Flüssigkeit befüllt. Daraufhin wurde die Fingerkuppe mit einer dünnen Silikonschicht versiegelt. Die ersten Versuche haben darauf abgezielt, den Fingeraufbau direkt unter die Fingerkuppe des Benutzers zu befestigen und mit Hilfe eines Elektromagneten, der unmittelbar über dem Fingernagel des Benutzers befestigt war, ein Magnetfeld zu erzeugen, welches das MRF zum erhärten bringt. Nach ersten Tests musste man jedoch feststellen, dass Elektromagnete mit den vorgegebenen begrenzten Durchschnittsgröße (Ø 25 mm) ein zu schwaches Magnetfeld erzeugen um die Flüssigkeit, im unter dem Finger befestigten Aufbau, spürend zu verändern. Ein größerer Elektromagnet würde die Anforderung, dass man die Hände frei bewegen soll, verletzen. Darüber hinaus würde man nicht mehrere Elektromagnete

¹ <https://www.staedtler.de/de/FIMO/> abgerufen am 12.12.2016

an einer Hand unterbringen können, ohne dass der Handschuh von den Benutzern zu klobig wahrgenommen werden würde.



Abbildung 26: Zu sehen sind vier Prototypen der Fingerkuppe. Oben links: Negativform einer Zeigefingerkuppe und gepresste Gegenstücke in Silikon. Oben rechts: 3D-Druck der ersten Fingerkuppe mit Raum für einen Elektromagneten und einen Zeigefinger. Unten links: 3D-Druck des Fingeraufbaus mit Raum für Elektromagneten samt Lüftungsschlitzen und integriertem Platz für die Force-Feedback Mechanik. Unten rechts: erster 3D-Druck des Fingeraufbaus, diesmal mit einem Fingekuppenschacht um unterschiedliche Fingerkuppen zu bedienen.

Die auf der [Abbildung 26](#) abgebildeten Fingerkuppen auf der oberen linken Seite, waren Versuche der Erstellung von einheitlichen Fingerkuppen - als Negativform wurde ein in einer CAD Anwendung modellierter 3D-Druck verwendet.

Ein nächster Aufbau, innerhalb der Entwicklungsschritte, ist auf der oberen rechten Seite zu sehen. Hier wurde ebenfalls in einer CAD Anwendung ein Aufbau konstruiert, der Platz für einen Zeigefinger, das MRF-Pad und den Elektromagneten innehielt. Dieser wurde jedoch relativ schnell verworfen, da der Elektromagnet zwar einen zufriedenstellenden Effekt auf das darüber liegende MRF auslöste, jedoch die Lage den Benutzer in seiner Greifinteraktion zu sehr einschränken würde. Der relativ große Elektromagnet (kleinere boten ein zu schwaches Magnetfeld) unter der jeweiligen Finger würde keinen Pinzettengriff zulassen. Somit disqualifizierte sich dieser Ansatz ebenfalls.

Bei der vierten Iteration platzierte man den Elektromagneten über den Finger des Benutzers. Um jedoch das MRF gen Fingerkuppe zu

ziehen, wurde eine mechanische Lösung gefunden. Ein Federblech, welches durch ein Magnetfeld angezogen werden kann, wurde in Form eines Jochs konstruiert. Im unteren Bereich des Jochs, ist das MRF-Pad platziert, welches beim Ansteuern des Elektromagneten gegen die menschliche Fingerkuppe drückt. [Abbildung 26](#) zeigt im unteren linken Bereich den aller ersten Prototypen mit diesem Ansatz. Wobei da der Raum für den Finger noch integriert im Aufbau vorzufinden war, so ist im unteren rechten Bereich die modulare Version zu sehen. In dieser letzten Version ist ein Schacht für unterschiedliche Fingergrößen zu sehen.

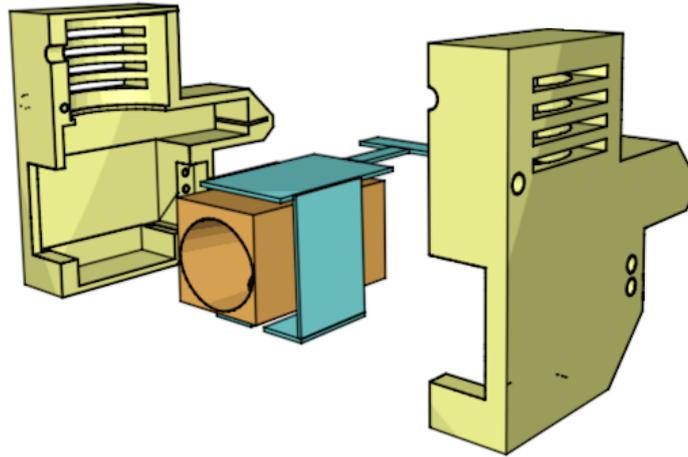


Abbildung 27: Skizze des finalen Zeigefinger Aufbaus. Links und rechts sind ist der Aufbau zum Zusammenschrauben. In Orange gehalten ist die Kuppe für den Finger, in unterschiedlichen Größen. Das eiserne Joch mit dem T-Stück aus Federblech ist in der Farbe Türkis.

Das Joch aus Eisen mit einem T-Stück aus Federblech sieht man auf der Skizze in der [Abbildung 27](#). Während der gesamte Finger-Aufbau mit PLA-Filament an der Hochschule Pforzheim, Fakultät für Gestaltung, 3D gedruckt wurde, so wurde das Joch von den Werkstätten der Universität Konstanz gefertigt. Das Eisenblech und das Federblech (Stärke 0.4 mm) wurde mit Wasserstrahl ausgeschnitten und mit Laser zusammenschweißt. Die Federwirkung wird verstärkt durch das Anbringen des Jochs im 15° Winkel zur Fingerkuppe.



Abbildung 28: Drei Fingeraufbauten für den Daumen, Zeigefinger und Mittelfinger. In der Mitte und rechts ist ein aufgeklappter Zeigefinger-Aufbau zu sehen.

Der FluidHaptics Fingeraufbau lässt sich mit jeweils vier M1.4x12 Schrauben zusammenhalten. Die unterschiedlich großen Fingerkuppen-Einsätze können einfach in den Schacht gesteckt werden. Die [Abbildung 29](#) veranschaulicht zwei FluidHaptics Fingeraufbauten in ihren Einzelteilen. Auf der linken Seite mit zwei Daumenmodulen und auf der rechten Seite mit drei unterschiedlichen Zeigefingermodulen.

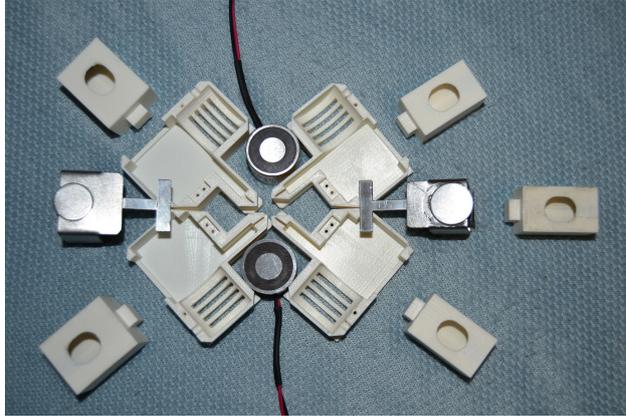


Abbildung 29: FluidHaptics Daumen und Zeigefinger. Alle Einzelteile der FluidHaptics Aufbauten. Halterung, Elektromagnet, Eisenjoch mit Federblech T-Stück, Fingermodule in diversen Größen.

Die Funktionalität des Aufbaus kann folgendermaßen beschrieben werden: Sobald der Elektromagnet mit voller Leistung betrieben wird, setzt das Magnetfeld ein und zieht das Joch nach oben. Durch die magnetische Feld wird auch das MRF härter und drückt gegen die Fingerkuppe. Die Feder zieht das Joch beim senken der Magnetkraft wieder nach unten. Dies hat zur Folge, dass unterschiedlicher Druck auf die Fingerkuppe ausgelöst werden kann. [Abbildung 30](#) illustriert dieses Verhalten.

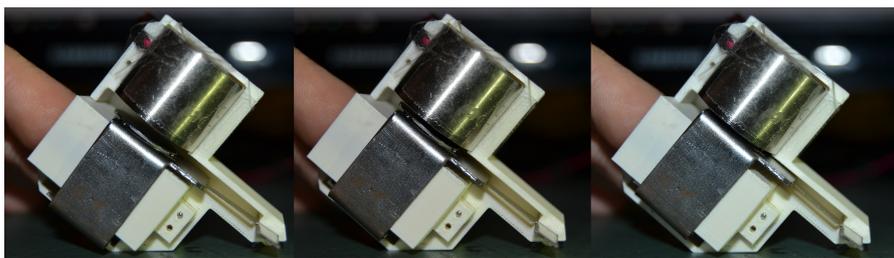


Abbildung 30: Wenn kein Magnetfeld durch den oben gehaltenen Elektromagnet erzeugt wird, zieht die Blechfeder das Joch nach unten. Sobald der Elektromagnet ein Magnetfeld erzeugt, so wird das Joch nach oben gezogen und ein dynamischer Druck erzeugt, abhängig von der Stärke des Magnetfelds.

Die maximale Höhe, die auch die Intensität des Drucks widerspiegelt, beträgt bei der FluidHaptics Fingerkuppe 4 mm, wobei die Flüss-

sigkeit ebenfalls, je näher sie zum Magnetfeld gerichtet ist, härter wird.

Tabelle 6 stellt die technischen Eigenschaften einer FluidHaptics Fingerkuppe dar.

	FluidHaptics
Prinzip	Force-Feedback mit Smartfluids
Höhenverstellbereich	3.5 mm
max. Druckstärke	~ 200 gf
max. Winkel	90°
Gewicht	97 g
Maße	60x56x30 mm

Tabelle 6: Technische Eigenschaften von FluidHaptics

Im nächsten Kapitel wird erklärt, wie die Elektromagnete angesteuert werden und wie die Kommunikation zwischen der VR-Anwendung mit der FluidHaptics Fingerkuppe realisiert ist.

4.1.3 FluidHaptics Elektromagnet & Steuereinheit

Zur Erzeugung eines Magnetfelds werden sechs Elektromagnete durch eine Steuerungseinheit angesteuert. Pro Hand können drei Elektromagnete eingesetzt werden.

Bei den Elektromagneten handelt es sich um Elektrohaftmagnete, die eine Zugkraft von maximal 150N haben. Bei einem Abstand zum Eisenjoch von 4 mm ist die Kraft bei 0.01N und steigt exponentiell an. Bei einer Distanz von 1 mm sind es 2N. Weitere technische Daten des Elektromagnets können im Anhang dem Datenblatt entnommen werden.

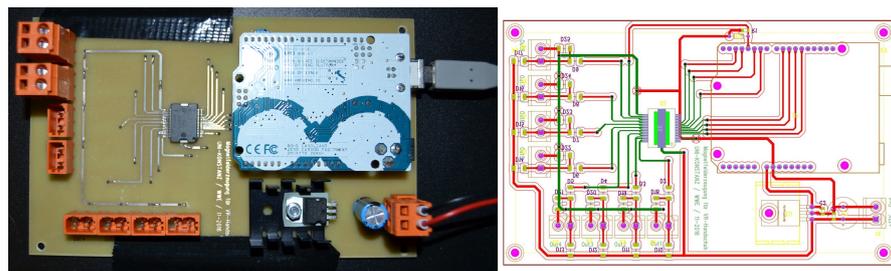


Abbildung 31: Links ist die gefertigte Steuerungseinheit, angeschlossen per USB 2.0 an einen PC. Die Stromversorgung ist über ein 24V Netzteil gesichert. Rechts ist das zuvor gefertigte Layout.

Die Anstuererelektronik ist auf einer Europlatine (Abbildung 31) mit den Maßen 100 mm auf 160 mm untergebracht. Auf dieser befinden sich ein Steckplatz für einen Arduino vom Typ Uno, ein Spannungsregler, ein Leistungstreiber mit acht Kanälen und Buchsen für

die Stromversorgung und den Anschluss der Magnete. Sieben der acht Ausgangsbuchsen sind PWM-fähigen Pins des Arduino Microcontrollers zugeordnet. Wobei die Zuordnung dem Schema aus [Tabelle 7](#) entspricht.

Ausgang	Arduino-Pin	PWM-fähig
OUT1	D12	✓
OUT2	D11	✓
OUT3	D10	✓
OUT4	D9	✓
OUT5	D6	✓
OUT6	D5	✓
OUT7	D3	✓
OUT8	D2	X

Tabelle 7: Pinzuordnung der FluidHaptics Steuereinheit an die Pins des Arduino Uno

Über die USB 2.0-Schnittstelle des Arduino Uno werden diesem Datenworte zur Ansteuerung der Ausgänge übergeben. Der Leistungstreiber setzt die TTL-Pegel in den Pegel der Versorgungsspannung um, so dass die Magnete damit versorgt werden können. Der Leistungstreiber schützt sich selbst gegen Kurzschlüsse an den Ausgängen und gegen Übertemperatur. Bei letzterer schaltet er sich nicht nur aus, sondern gibt zusätzlich ein high-aktives Diagnosesignal aus. Dieses kann am Arduino-Pin D4 ausgewertet werden.

Die Intensität der Elektromagnete ist im Intervall zwischen 0 und 255 definiert, sodass 0 zu keinerlei Druckstärke und 255 zur vollen (~ 200 gf) Druckstärke führt. Da die Magnetstärke exponentiell zum Abstand des angezogenen Metalls steigt, haben die Wertigkeiten entsprechende Kodierung.

Datenwort	Ø-Drucktiefe	Ø- Druckstärke
0	0.0 mm	0 gf
64	0.5 mm	1.5 gf
128	1.0 mm	7.5 gf
196	2.0 mm	41 gf
255	3.5 mm	185 gf

Tabelle 8: Die Datenworte 0-255 resultieren die Intensität des Magnetfelds, welches die Druckstärke von 0 bis durchschnittlich 185 gf auslöst.

[Abbildung 32](#) stellt das Mapping der Datenworte auf die entsprechend resultierende Druckstärke dar. [Tabelle 8](#) zeigt zudem die ausgelöste Drucktiefe abhängig von dem gesendeten Datenwort auf.

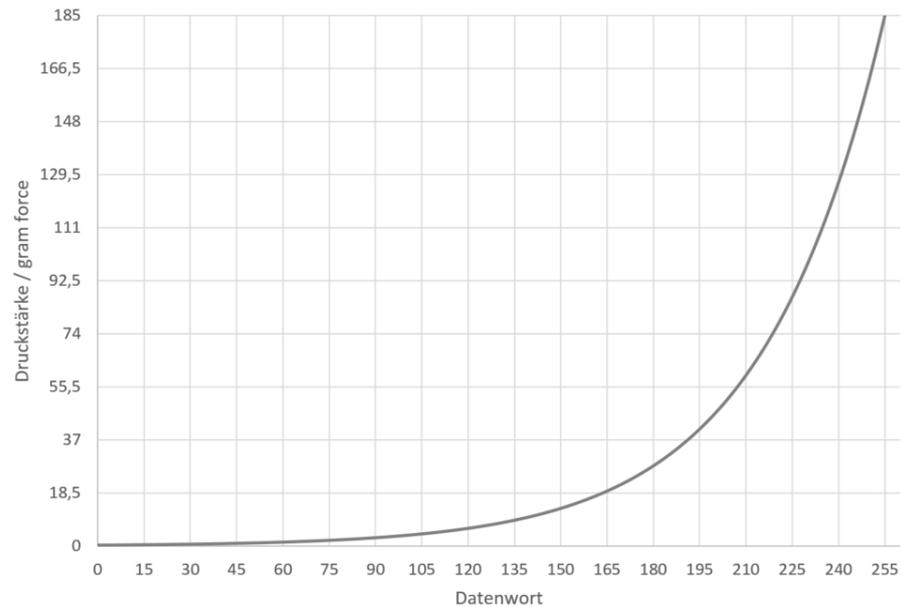


Abbildung 32: Exponentielle Verteilung der Datenwort/Druckstärke nach folgender Funktion: $f(x) = 0.03 * 1.02551^x$

Der FluidHaptics Aufbau erzeugt einen Druck auf die Fingerkuppe. Da die Festigkeit der Fingerkuppen von Mensch zu Mensch unterschiedlich sind, können keine wahrgenommene Druckstärken variieren. Die Drucktiefe ist jedoch von der Konstruktion beschränkt. Die wahrgenommene Druckstärke hängt somit von dem jeweiligen Benutzer ab. In Vorabtests wurde festgestellt, dass für eine Drucktiefe von 3.5 mm auch weitaus höhere gf von Nöten sind, welche vom FluidHaptics System auch unterstützt werden. Die Angaben in der [Tabelle 8](#) und auf der [Abbildung 32](#) sind daher Durchschnittswerte.

Die Datenworte werden von einer VR-Anwendung über die serielle Schnittstelle an das Arduino Uno Board gesendet. Auf diesem läuft eine einfache C++ Routine, die im Falle eines seriellen Signals, die Nachricht dem entsprechenden Finger zuordnet und die Intensität (0-255) an den gewünschten Elektromagnet weitersendet. Per `analogWrite()` wird das Datenwort an den PWM-Pin gesendet.

Technische Daten zu der Ansteuerplatine, sowie Sicherheitshinweise und Hinweise zum bestimmungsgemäßem Gebrauch können im Anhang der Technischen Dokumentation entnommen werden.

4.2 ANWENDUNGSSYSTEM

Der FluidHaptics Handschuh ist speziell für den Gebrauch innerhalb von VR/AR Anwendungen konzipiert. Zur Überprüfung der Funktionalität ist die Verbindung des FluidHaptics Systems zur VR umgesetzt worden. Die Ansteuerung der FluidHaptics Steuerplatine erfolgt durch eine Anwendung, die mit Hilfe der Oculus Rift CV1 bedient

werden kann. Umgesetzt wurde diese Anwendung mit der Unity3D Engine. In den Unterabschnitten dieses Kapitels wird insbesondere der Algorithmus bei der Berührung von virtuellen Objekten unter die Lupe genommen. Des Weiteren wird das Tracking des Arms erläutert und der Aufbau des OptiTrack Systems beschrieben. [Abbildung 33](#) verschafft einen ersten Überblick über die Gesamtarchitektur, sowie die Kommunikationswege zwischen den einzelnen Komponenten.

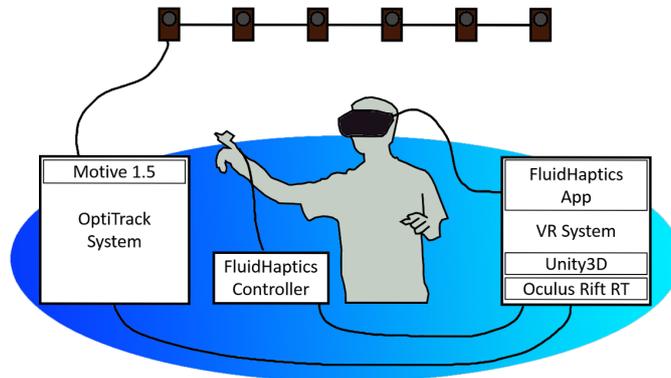


Abbildung 33: Das OptiTrack System kommuniziert über eine LAN-Verbindung via UDP mit dem VR System. Der FluidHaptics Controller ist über eine USB 2.0-Schnittstelle und die Oculus Rift über eine USB 3.0-Schnittstelle mit dem VR-System verbunden.

4.2.1 VR Anwendung

Die VR Anwendung wurde in der Unity3D Engine entwickelt und lässt sich mit der Oculus Rift CV1 bedienen. Das Schlüsselement dieser Anwendung ist das Ansteuern der FluidHaptics Steuerplatine zur Generierung der Druckstärke durch Erzeugen eines Magnetfelds. Dies erfolgt durch Kollision der virtuellen Finger mit einem virtuellen harten Körper. Es wird folgend unter einer direkten Haptik und einer fluiden Haptik unterschieden. Bei der direkten Haptik wird bei Kollision der Finger zu einem Objekt der volle Druck auf die Fingerkuppe ausgeführt. Bei der fluiden Haptik hängt der gebotene Druck auf die Fingerkuppe von der Kollisionstiefe ab. D.h. sobald der Benutzer mit der virtuellen Hand ein Objekt nur leicht kollidiert, wird auch nur ein leichter Druck erzeugt. Je tiefer die Penetration, desto stärker ist der Druck. [Abbildung 34](#) illustriert den fluiden Druck.

Zur Bestimmung der Kollisionstiefe bietet Unity3D eine dankbare Umgebung, mit der es ermöglicht wird die Normalen eines Objekts zum Pivotvektor eines anderen Objekts zu richten, um so die Distanz zwischen diesen beiden Objekten zu berechnen.

Basierend auf der Penetrationstiefe wird eine serielle Nachricht mit dem betroffenen Finger, sowie dem Datenwort zur passenden Druck-

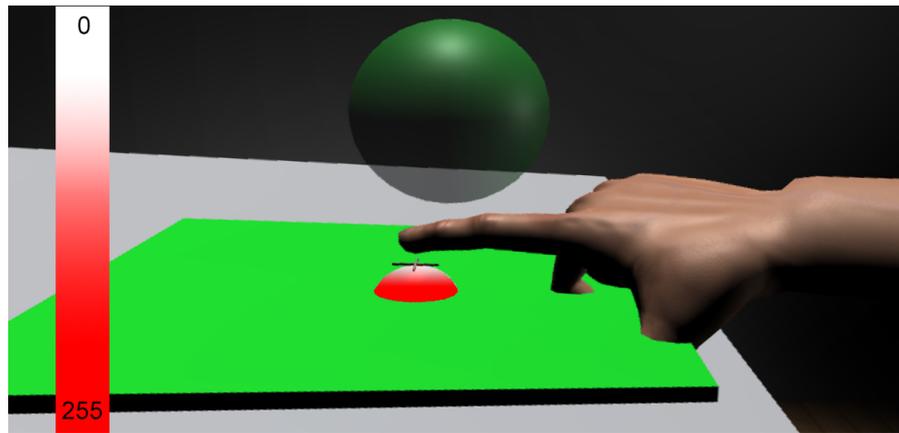


Abbildung 34: Je tiefer die Penetration des Zeigefingers auf der Halbkugel ist, desto höher ist die erzeugte Druckstärke durch FluidHaptics.

stärke gesendet. Bei einer Penetration von 0.5 mm ist das Datenwort 64. Der dabei erzeugte Druck ist im Durchschnitt 1.5 gf.

Die Anwendung ist auf einem VR-fähigen Rechner getestet worden, der mit einer nVidia GeForce GTX 970 Grafikkarte ausgestattet und somit den Mindestanforderungen der Oculus Rift CV1 entspricht.

Um die Immersion innerhalb der VR-Anwendung für den Benutzer zu steigern wurde eine realitätsnahe Hand implementiert. Das Armmodell wurde im Unity3D AssetStore [61] erworben und in die Anwendung integriert.

Im weiteren Abschnitt wird die Realisierung der virtuellen Armbe-
wegung anhand von den erfassten Daten der realen Hand, mit Hilfe
des OptiTrack Systems erläutert.

4.2.2 Tracking der Hand

Zu Beginn dieser Masterthesis war es vorgesehen, das Tracking der Hände mit auf einer VR-Brille montierten LeapMotion² zu realisieren. Nach Komplikationen mit der Erkennung der Hand beim Tragen des FluidHaptics-Handschuhs ist die Entscheidung auf das OptiTrack System³ gefallen. Das bereits bewährte System basiert auf der optischen Erkennung von reflektierenden Markern durch Infrarot-Kameras. Die Erkennung setzt auf die Triangulation der Kamerabilder und berechnet somit die genaue Position der Marker im Raum.

Für die Erkennung der Armbe-
wegung werden zwei unterschiedliche Markersets verwendet. Ein Markerset ist für die Position, sowie Orientierung des Arms zuständig, das zweite Markerset ist für die Position, sowie Orientierung der Hand verantwortlich. Die VR-Anwendung und das OptiTrack System laufen auf unterschiedlichen

² <https://www.leapmotion.com/> aufgerufen am 12.12.2016

³ <http://optitrack.com/> aufgerufen am 12.12.2016

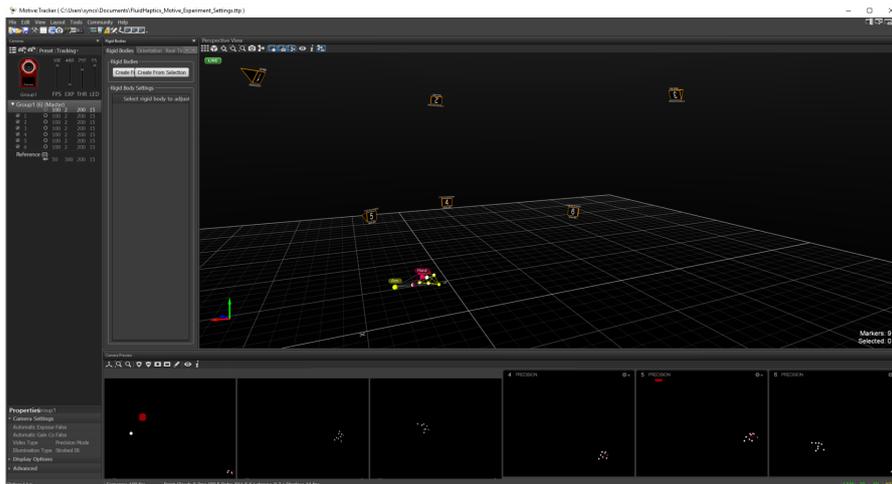


Abbildung 35: Das Setup für die Studie bestand aus 6 Flex13 Kameras, die durch einen OptiHub USB-Hub mit einem Rechner verbunden waren.

Rechnersystemen, daher werden die erfassten Koordinaten des OptiTrack Systems via LAN auf das VR-System gesendet und dort mit dem virtuellen Armmodell verknüpft.

In diesem Kapitel wurde das FluidHaptics System mit all seinen Komponenten beschrieben. Im nächsten Kapitel wird die Evaluation des Systems erörtert und es werden die Ergebnisse der Benutzerstudie diskutiert.

In Folge der Entwicklung des FluidHaptics Systems wurde eine Nutzerstudie ausgeführt, um festzustellen ob das System, durch haptisches Feedback, die Genauigkeit innerhalb der VR Umgebung entscheidend erhöht. Es wurden zwei unterschiedliche Ansätze zu taktilen Reizen auf ihre Leistung überprüft - zum einen die im [Unterabschnitt 4.2.1](#) vorgestellte direkte Haptik und die dynamische, fluide Haptik, die abhängig von der Penetrationstiefe ausgelöst wird. Als Kontrollschnittstelle, gegenüber dem haptischen System, fungierte die Visual-only Bedingung, bei der die Nutzer exakt die gleichen Aufgaben zu verrichten hatten, ohne jedoch taktile Reize zu erfahren, sondern ausschließlich auf ihre Sehfähigkeit zurückgreifen sollten.

Neben der Evaluierung der grundsätzlichen Funktionalität der FluidHaptics Fingerkuppe, sollten Probanden unterschiedliche Druckintensitäten identifizieren und zur Bewertung der Genauigkeit zwei unterschiedliche Targetingaufgaben [2] [68] durchführen. Bei der ersten Targetingaufgabe sollten Probanden akkurat auf ein Objekt zeigen, bei der zweiten Targetingaufgabe sollten unterschiedliche Linien abgefahren werden. Beide Targetingaufgaben sollten die Genauigkeit der Interaktion innerhalb von VR-Anwendungen bestimmen.

In den folgenden Unterkapiteln werden die Hypothesen erläutert, der Studienaufbau und -ablauf beschrieben, sowie die Ergebnisse dokumentiert.

5.1 FORSCHUNGSFRAGE & HYPOTHESEN

Ausgehend von der Forschungsfrage werden in diesem Unterkapitel Subfragen und Hypothesen ausformuliert und miteinander in Verbindung gesetzt.

5.1.1 Forschungsfrage

Um das Ziel der Nutzerstudie klar zu definieren, wurde eine Forschungsfrage formuliert.

Forschungsfrage (FF): Kann die Effizienz und Genauigkeit innerhalb von VR-Anwendungen durch *dynamische Druckstärken* auf Fingerkuppen entscheidend angehoben werden?

Folgende *Unterfragen* sollten beantwortet werden:

- **FF1:** Wie ist die Performanz unter jeweiligen Bedingungen?

- **FF2:** Unter welchen Bedingungen können Targetingaufgaben am schnellsten durchgeführt werden?
- **FF3:** Ist die Interaktion mit virtuellen Objekten innerhalb der VR mit taktilen Feedback genauer?

5.1.2 Hypothesen

Basierend auf den zuvor definierten Forschungsfragen wurden unterschiedliche Hypothesen (H) aufgestellt. Folgend werden die Hypothesen, mit gekennzeichneter Verbindung zu den Forschungsfragen, aufgelistet:

- **H1:** Systeme mit haptischem Feedback führen zu einer höheren Genauigkeit beim Erzielen von Objekten und Abfahren von Pfaden, als Systeme ohne haptischem Feedback (FF3).
- **H2:** Dynamische Druckstärken durch FluidHaptics wird dazu führen, dass Nutzer die niedrigsten Fehlerraten produzieren, da die Penetrationstiefe bei Kollision der Fingerkuppe taktil erfahrbar gemacht wird (FF1).
- **H3:** Teilnehmer der Studie werden bei der Bedingung ohne jegliche Haptik (VisualOnly) die Ausführungen am schnellsten vollziehen, da sie sich ausschließlich auf die visuellen Kognition konzentrieren müssen (FF2).

5.2 STUDIENDESIGN

Der Versuchsplan wurde mit Messwiederholungen (within-subjects-design) konzipiert, wobei alle Probanden jeweils die Aufgaben mit allen gebotenen Benutzerschnittstellen randomisiert vollzogen. Folgende unabhängige Variablen wurden einbezogen:

- **Komplexität:** Beim Nachfahren der Linien gibt es einfache Übungen und schwere Übungen (lineare Linien und kurvenreiche Linien)
- **Distanzen:** Bei der Übung zum Erzielen von Objekten variieren die Größen der Objekte. Objekte sind kleiner als die Fingerkuppe, so groß wie die Fingerkuppe und größer als die Fingerkuppe. Durch diesen Umstand ändern sich die Distanzen zum Zielobjekt.
- **Benutzerschnittstellen:** VR Anwendung ohne Haptik (VisualOnly), VR Anwendung mit direkter Haptik durch FluidHaptics (Haptic), VR Anwendung mit dynamischer Haptik (FluidHaptic)

Während den Übungen wurde die Zeit gemessen, sowie die Distanz der Fingerkuppe zum erzielenden Objekt bzw. zur Linie, die nachgefahren werden soll. Somit zählten die Ausführungsdauer und die Fehlerdistanz zu den abhängigen Variablen. Die Position der Fingerkuppe wurde während jedem Durchgang als Vektor in einer XML Datei geloggt.

Darüber hinaus wurde nach den Übungen ein User Experience Questionnaire (UEQ) eingesetzt, um das FluidHaptics System auf die Attraktivität zu bewerten.

5.2.1 Benutzerschnittstelle

Bei der Studie wurde der FluidHaptics Handschuh eingesetzt. Um die Vergleichbarkeit zwischen den unterschiedlichen Bedingungen beizubehalten, haben Probanden den Handschuh während des gesamten Experiments, auch bei VisualOnly, getragen. Der Arm des Probanden wurde durch das OptiTrack System erfasst und die Position, sowie Orientierung in die VR Anwendung überführt. [Abbildung 36](#) zeigt einen Probanden mit dem FluidHaptics Handschuh, sowie seine Perspektive innerhalb der VR-Brille.

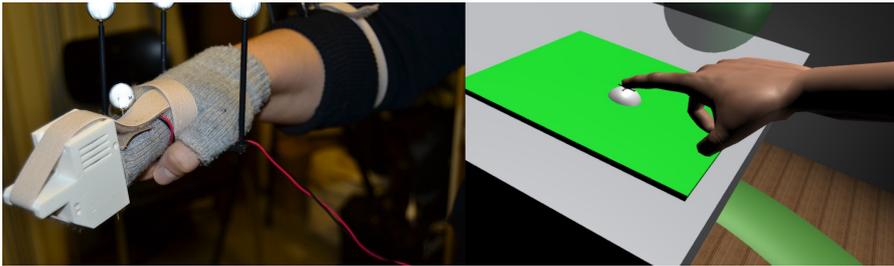


Abbildung 36: Auf der linken Seite ist der FluidHaptics Handschuh, für die Studie nur mit Zeigefinger Aufbau. Rechte Seite zeigt die Perspektive des Probanden innerhalb der VR-Anwendung.

Sowohl die direkte Haptik, als auch die dynamischen Haptik wurde von dem FluidHaptics Aufbau erzeugt. Nochmals zusammenfassend die Benutzerschnittstellen:

- **VisualOnly:** Proband interagiert innerhalb der VR-Anwendung mit seinem rechten Arm, erhält jedoch keinerlei haptisches Feedback.
- **Haptic:** Proband interagiert innerhalb der VR-Anwendung mit seinem rechten Arm, erhält bei Kollision zwischen seinem Zeigefinger und einem festen Objekt einen immer gleichbleibenden festen Druck.
- **FluidHaptic:** Proband interagiert innerhalb der VR-Anwendung mit seinem rechten Arm, erhält bei Kollision zwischen seinem Zeigefinger und einem festen Objekt einen dynamischen Druck

auf die Fingerkuppe. Die Druckstärke hängt von der Penetrationstiefe ab.

Bei allen Bedingungen haben Teilnehmer der Studie ein Oculus Rift CV1 Headset getragen, um die Objekte sowie deren virtuellen Arm zu sehen. Während der Ausführung standen die Teilnehmer auf der schwarzen Linie gerichtet zu den OptiTrack Kameras (siehe [Abbildung 37](#)).



Abbildung 37: Teilnehmer standen während der Studie neben dem Tisch, mit dem Gesicht gerichtet zu den OptiTrack Kameras. Der schwarze Strich am Boden gab die Blickrichtung vor. Auf dem rechten Bild ist ein Teilnehmer während des Experiments zu sehen. Sein Arm wird von sechs OptiTrack Kameras getrackt.

Zum Einsatz kam darüber hinaus der Remote Controller von Oculus Rift. Mit dem Controller sollten die Teilnehmer den Start- und Stopzeitpunkt ihrer Ausführungen markieren. Bedient wurde dieser mit der linken Hand.

5.2.2 Aufgaben

Die gesamte Studie umfasste drei unterschiedliche Aufgaben. Die erste Aufgabe sollte dazu dienen, Probanden an die VR Umgebung zu gewöhnen und ihnen erste haptische Rückkopplungen zu geben. Unterschiedliche *Druckintensitäten* sollten von Probanden identifiziert und nach ihrer Intensität sortiert werden. Die zweite Aufgabe hatte die *Zielgenauigkeit* im Fokus und die dritte Aufgabe sollte die *Genauigkeit der Bewegung* (Zeichengenauigkeit) beim Nachfahren eines Pfads untersuchen. Im folgenden werden die einzelnen Aufgaben detailliert erörtert:

1. **Druckintensitäten:** Die erste Aufgabe war gegliedert in drei Unteraufgaben. Jeweils sollten die Druckintensitäten erkannt und benannt werden.
 - a) Probanden hatten vor sich vier Ringe (siehe [Abbildung 38](#)). Sobald der Teilnehmer seinen Zeigefinger durch den Ring

geführt hat, erhielt er einen Druck. Jeder Ring hatte einen unterschiedliche Druckstärke. Der Proband hatte jeweils nur eine Möglichkeit diesen Druck zu spüren. Sobald er seinen Zeigefinger aus dem Ring gezogen hat, ist der Ring verschwunden.

- Ring 1: 60 gf
- Ring 2: 112 gf
- Ring 3: 185 gf
- Ring 4: 40 gf

Nach der Durchführung wurde der Teilnehmer nach der Reihenfolge der Intensität befragt. Die korrekte Reihenfolge ist demzufolge 4, 1, 2, 3.

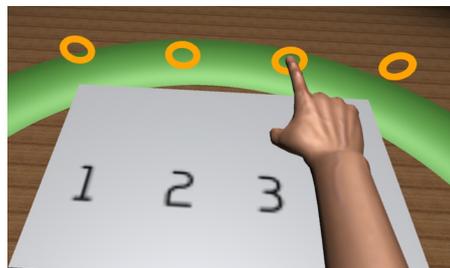


Abbildung 38: Beim Durchbohren der Ringe erfährt der Nutzer unterschiedliche Druckintensitäten (1a), Verläufe (1b) oder Vibrationen (1c).

b) Ebenfalls vier Ringe hatten die Probanden bei der zweiten Unteraufgabe. Hinter den Ringen haben sich diesmal Druckverläufe verborgen. Die Aufgabe war es jeweils den Zeigefinger durch den Ring zu schieben und den Verlauf der Druckstärke zu identifizieren.

- Ring 1: sehr schwach → sehr stark: 1 gf → 185 gf
- Ring 2: sehr stark → sehr schwach: 185 gf → 1 gf
- Ring 3: stark → schwach: 46 gf → 3.7 gf
- Ring 4: schwach → stark: 3.7 gf → 46 gf

Nach der Durchführung sollten die Probanden erneut ihre Beobachtung kommentieren und die Ringe den Verläufen korrekt zuordnen.

c) Bei der dritten Unteraufgabe erhielten Teilnehmer, beim Durchbohren der Ringe, unterschiedliche Vibrationen. Hierbei wurden zwei unterschiedliche Druckstärken alterniert.

- Ring 1: 5 gf ↔ 3.7 gf
- Ring 2: 3.7 gf ↔ 6.2 gf
- Ring 3: 13.1 gf ↔ 21.7 gf

- Ring 4: 98.5 gf ↔ 185 gf

Nach der Ausführung dieser Übung, wurden Teilnehmer nach ihrer Empfindung bzgl. der unterschiedlichen Vibrationen befragt. Welche Vibration als angenehm und welche als unangenehm wahrgenommen wurden, sollte von den Probanden kommentiert werden.

2. **Targeting Accuracy (Zielgenauigkeit):** Teilnehmer hatten während dieser Aufgabe in der rechten Hand den FluidHaptics Handschuh und in der linken Hand einen Oculus Rift Remote Controller. Vor ihnen befand sich eine transparente Kugel. Sobald ein Teilnehmer seinen Zeigefinger in die transparente Kugel (siehe [Abbildung 39](#)) gesteckt hat, konnte er auf dem Remote Controller auf den One-Button klicken. Nach diesem Klick erschien vor ihm ein Objekt, auf dem ein Fadenkreuz platziert war. Insgesamt handelte es sich um drei unterschiedliche Objekte (siehe [Abbildung 39](#)). Eine Pyramide, die durch ihre Spitze kleiner als eine Fingerkuppe ist ([39A](#)). Eine Kugel ([39B](#)), die genauso groß ist wie eine Fingerkuppe und zuletzt eine planare Fläche, die größer ist als eine Fingerkuppe ([39C](#)). Die Ausführung begann mit dem ersten Druck auf die Taste des Remote Controllers. Der Proband sollte nun seinen Zeigefinger auf das

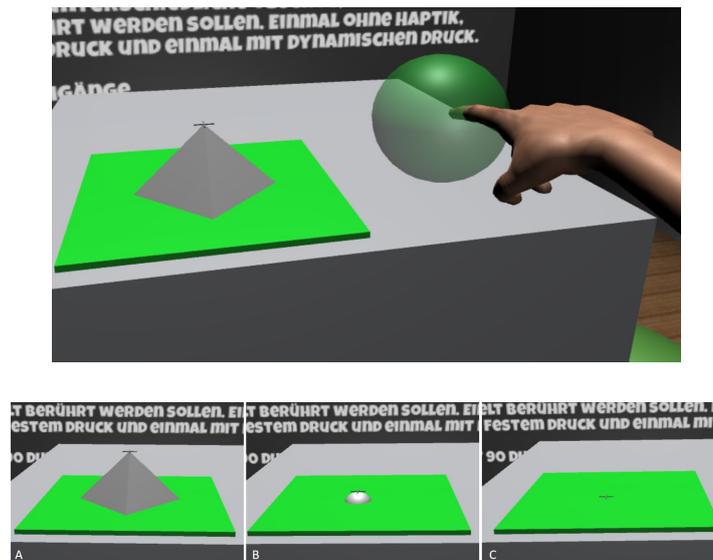


Abbildung 39: Oben: Proband sieht vor sich eine transparente Kugel, die als Offspace dient, um Zielobjekte durch Klicken des Remote Controllers zum Erscheinen zu bringen. Unten: Objekte bei der Aufgabe zur Zielgenauigkeit. Pyramide (A), die kleiner ist als eine Fingerkuppe. Kugel (B), die so groß ist wie eine Fingerkuppe. Planare Oberfläche (C) die größer ist als eine Fingerkuppe.

auf dem Objekt befindende Fadenkreuz legen. Sobald er sich

sicher war, dass der Finger auf dem Fadenkreuz ist, klickte er erneut die Taste, um die Ausführung abzuschließen. Das zu erzielende Objekt verschwand und der Nutzer hatte nun die Möglichkeit einen neuen Versuch auszuführen, durch das Bewegen des Zeigefinger ins Abseits (transparente Kugel). Die Distanz zwischen dem Fadenkreuz und der transparenten Kugel betrug 25 cm.

Erfasst wurde während dieser Aufgabe die Ausführungszeit zwischen den Auftauchen und dem Erzielen des Objekts. Ebenso wurde die Position des Zeigefingers geloggt, um die Fehlerdistanz zu berechnen.

3. **Tracing Accuracy (Zeichengenauigkeit):** Bei der dritten Aufgabe mussten Teilnehmer der Studie Pfade im Raum mit dem Zeigefinger abfahren. Es handelte sich um lineare aber auch um kurvige Pfade, die den Probanden in horizontaler und vertikaler Ausrichtung entgegengestellt waren. [Abbildung 40](#) veranschaulicht die Unterschiedlichen Pfade.

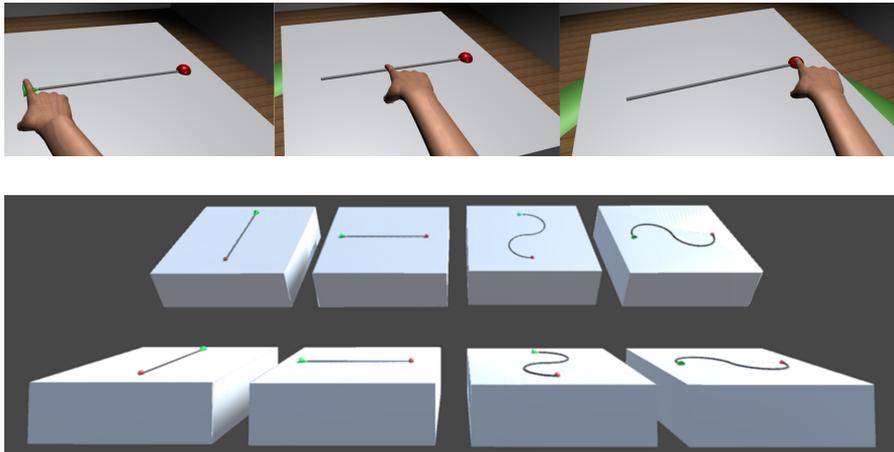


Abbildung 40: Oben: Ausführung der dritten Aufgabe. Proband startet beim grünen Kegel, führt den Zeigefinger der Linie entlang und beendet die Ausführung bei Erlangen der roten Kugel. Unten: Vertikal und horizontal gerichtete Pfade, linear und kurvig. Zum einen flach vor dem Teilnehmer, zum anderen um 35° zum Proband geneigter Fläche. Untere Abbildung wurde aus der Arbeit von Benko et al. adaptiert [2]

Die Linien lagen entweder flach auf dem virtuellen Tisch oder waren zu den Probanden im 35° Winkel zugerichtet. Die Ausführung startete der Teilnehmer in dem er den Zeigefinger auf den grünen Kegel bewegte und dann mit der Oculus Remote den One-Button drückte. Das war den Moment, wenn die Zeitmessung für die Ausführung gestartet wurde. Mit dem Zeigefinger sollte der Proband nun den Pfad abfahren. Sobald der

Zeigefinger an der roten Kugel angekommen war, drückte der Teilnehmer erneut auf den One-Button der Oculus Remote in seiner linken Hand.

Neben der Ausführungszeit, wurde bei dieser Aufgabe, ähnlich wie bei der zweiten Aufgabe, die Distanz der Fingerkuppe zum nächstgelegenen Punkt des Pfades berechnet und in einer XML Datei geloggt.

Während der gesamten Durchführung der Aufgaben, hatten Teilnehmer die Möglichkeit ihre Beobachtung zu kommentieren. Darüber hinaus wurde die Ausführung nach Zustimmung aufgezeichnet, um Reaktionen der Probanden einzufangen.

5.3 METHODEN ZUR ERHEBUNG DER DATEN

Der Schwerpunkt der Studie lag auf den quantifizierten Daten, sodass das Logging der wichtigste Teil der Erhebung war. Neben dem Logging, wurde ein demografischer Fragebogen und der User Experience Questionnaire (UEQ) verwendet. Der UEQ wurde eingesetzt um den subjektiven Eindruck der Probanden gegenüber FluidHaptics quantitativ zu gewinnen.

Folgend werden die drei relevanten Methoden beschrieben:

- **Demografischer Fragebogen:** Der demografische Fragebogen diente dazu, allgemeine Daten zu erfragen. Dazu zählten das Geschlecht, das Alter, die Größe und der Beruf. Darüber hinaus wurde aus Sicherheitsgründen erfragt, ob der Proband über einen Herzschrittmacher verfügt. Auch die Erfahrung mit VR-Anwendungen wurde erfragt und bei bestehender Erfahrung das Ausmaß bestimmt. Ein Blankoformular des demografischen Fragebogens findet sich im Anhang wieder.
- **Logging:** Für die Aufgabe 2 und Aufgabe 3 wurde ein automatisches Logging implementiert. Neben der Dauer eines Versuchs wurde bei der Aufgabe 2 die Distanz zwischen der Fingerkuppe und dem jeweiligen Fadenkreuz berechnet und gespeichert. Die Koordinaten des Fadenkreuzes, sowie die der Fingerkuppe wurden ebenfalls festgehalten. Bei der Aufgabe 3 wurde ebenfalls die Dauer des Versuchs und die Koordinaten der Fingerkuppe aufgezeichnet. Pro Frame (60fps) wurde die Distanz der Fingerkuppe zum nächsten Punkt des Pfades berechnet und aufaddiert. Nach jedem Durchgang (Aufgabe 2 und Aufgabe 3) wurde das arithmetische Mittel für die Distanz im 3D-Raum, sowie separat im XY und Z Bereich berechnet und gespeichert.
- **UEQ:** Der User Experience Questionnaire bietet eine Möglichkeit der raschen Bestimmung der Benutzererfahrung in Bezug

auf harte aber auch weiche Faktoren. Bestehend aus 26 bipolaren Adjektivpaaren, werden sowohl hedonische Faktoren (Stimulation, Originalität) als auch pragmatische Qualitäten (Effizienz, Durchschaubarkeit, Verlässlichkeit) bemessen. Veröffentlicht wurde der UEQ von den Mitarbeitern der SAP AG, namentlich Laugwitz, Held und Schrepp [34]. Der User Experience Questionnaire existiert in diversen Sprachen und wurde während der Studie in deutscher Sprache ausgehändigt. Die Auswertung des Fragebogens erfolgte mit Hilfe des zum UEQ dazu gehörenden Excel-Sheets¹ unter Beachtung der Ratschläge des Artikels von Rauschenberger, Schrepp und Thomaschewski [52].

5.4 ABLAUF DER STUDIE

Der Ablaufplan der Studie ist, zwecks besserer Übersicht, in der [Abbildung 41](#) in drei Phasen aufgeteilt illustriert.

Die Studie wurde in einer kontrollierten Umgebung in den Räumen des Ateliers clausdesign.de in Pforzheim geführt. Das Studien-setting wurde teilweise mit Rücksprache von Microsoft Research adaptiert, daher konnte man den zeitlichen Rahmen bereits aus ihrer Erfahrung auf ca. 60 Minuten ansetzen.

In der Einführungsphase haben Teilnehmer zu Beginn ein Einleitungsschreiben erhalten, in dem sie über den Verlauf der Studie informiert wurden und darauf hingewiesen wurden, dass sie sich frei fühlen dürfen, und dass keinesfalls sie, sondern das FluidHaptics System getestet wird. Außerdem wurde in dem Schreiben erwähnt, dass die gesamte Studie aufgezeichnet wird. Ebenfalls in der ersten Phase wurde ein demographischer Fragebogen ausgehändigt. Neben den typischen Daten wurde ebenfalls abgeklärt, ob der Teilnehmer einen Herzschrittmacher besitzt, um potentielle Interferenzen mit dem Elektromagneten vorzubeugen.

Nachdem der Fragebogen ausgefüllt und die Einverständniserklärung zur Videoaufnahme unterzeichnet war, erhielt jeder Proband eine kurze Einführung in die VR Welt. Hierzu wurde eine kurze Oculus Rift Demonstration abgespielt (Oculus Dreamdeck Standard Demos). Nach dem ersten Eindruck der Virtual Reality, wurde die erste Szene des Experiments gestartet. An einem Monitor wurde die Szene im statischen Zustand erklärt. Danach wurden die Marker zur Erkennung der Arm- und Handbewegung am Probanden befestigt und der FluidHaptics Aufbau an den Zeigefinger umgeschnallt. Der Proband zog nun erneut das VR-Headset auf und erkundete die Experiment Szene. Die Aufgabenstellung war auf jeder Szene auf der gegenüberliegenden Wand in großen Lettern notiert, wurde dennoch von dem Studienleiter vorab erläutert.

¹ <http://www.ueq-online.org/> abgerufen am 28.12.2016

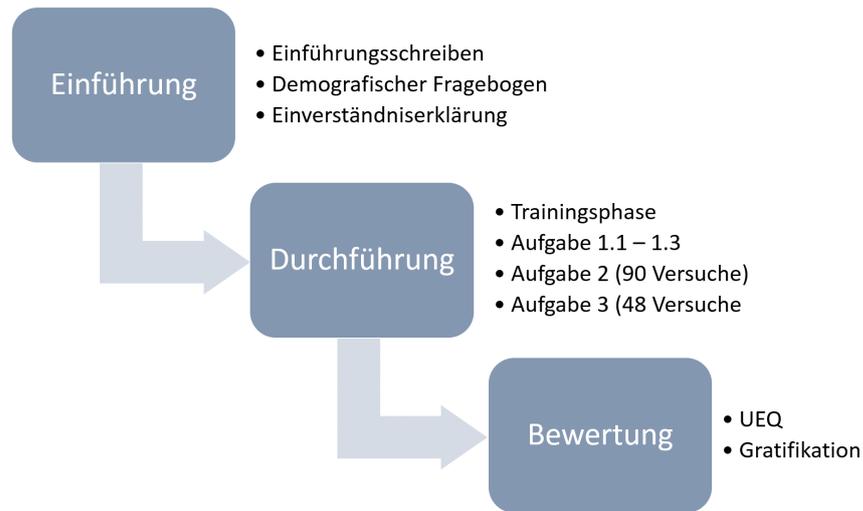


Abbildung 41: Ablauf der Studie auf drei Phasen aufgeteilt.

Jedes Objekt aus Aufgabe 2 erschien 10 mal pro Bedingung, sodass der Teilnehmer die Ausführung insgesamt 90 mal durchgeführt hat (10 Wiederholungen * 3 Objekte * 3 Benutzerschnittstellen). Die Benutzerschnittstellen wurden randomisiert bedient, sodass Effekte des sequentiellen Erlernens, durch Wiederholen der Aufgabe, ausgeschlossen werden konnten. Probanden haben ihre Ausführungen zufällig mit den Bedingungen des VisualOnly, Haptic oder FluidHaptic ausgeführt. Bei der 3. Aufgabe hat der Teilnehmer insgesamt jeden Pfad zweimal abgefahren, was zu 48 Durchführungen führte. 2 Durchgänge * 8 Pfadmöglichkeiten * 3 Benutzerschnittstellen.

Mit dem Beenden der letzten Aufgabe wurde der FluidHaptics Handschuh ausgezogen, die Marker entfernt und das Headset abgezogen. Der Proband wurde nun gebeten den User Experience Questionnaire auszufüllen. Nach einem Feedback, der protokolliert wurde, wurde eine Gratifikation in Höhe von 8.50 EUR an den Teilnehmer ausgehändigt.

Durchschnittlich dauerte die Studie 48 Minuten.

5.5 ERGEBNISSE

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der Studie zusammengefasst. Es wird auf die Zusammensetzung der Teilnehmer eingegangen und auf die Auswertung der verwendeten Methoden. Die erste Aufgabe, die dazu diente, sich mit dem System vertraut zu machen und die Funktionalität zu testen, wird als nächstes ausgewertet. Danach wird die zweite und dritte Aufgabe detailliert untersucht, wobei die Ausführungszeit sowie die Fehlerdistanzen ins Verhältnis gesetzt werden, um eine Signifikanz zwischen den drei unterschiedlichen Be-

dingungen feststellen zu können. Zuletzt wird der User Experience Questionnaire ausgewertet und der Benchmark präsentiert.

5.5.1 Teilnehmer

Es nahmen 14 Personen (8 weiblich, 6 männlich) an der Nutzerstudie teil. Alle Probanden waren Rechtshänder. Das Alter lag zwischen 18 und 60 ($M = 33.9$, $SD = 13.6$). Drei Teilnehmer hatten bereits erste Erfahrungen mit VR-Brillen (zwei mit Oculus Rift DK2 und eine mit HTC Vive) gesammelt, jedoch handelte es sich um einmaligen Kontakt. Keiner der Teilnehmer hatte einen Herzschrittmacher. Akquiriert wurden die Teilnehmer im Bekanntenkreis des Autors. Beruflich waren die Probanden durchweg gemischt (Schmuckschmiedin, Hausmeister, Textileinkäuferin, Informatikkaufmann, Werkzeugkonstrukteur, Hausfrau, Schauspielerin, Marketing Trainee, Unternehmensberater, Jurastudentin, Produktdesigner, BWL Studentin, Bankkaufmann). Die Körpergröße wurde zur Kalibrierung der VR-Szene verwendet und lag bei den Teilnehmern im Bereich zwischen 149 und 185 cm ($M = 170.7$ cm, $SD = 9.9$ cm). Alle Probanden erhielten eine Erstattung von 8,50 EUR.

5.5.2 Auswertung der ersten Aufgabe

Während der Durchführung der ersten Aufgabe wurde ein Protokoll geführt, in dem möglichst alle Reaktionen der Probanden notiert wurden. Nach der Durchführung der Aufgabe 1.1, wurde der Teilnehmer nach der Reihenfolge der Intensitäten von der Schwächsten zur Stärksten befragt. Das Balkendiagramm in der [Abbildung 42](#) zeigt die Häufigkeit der korrekten, sowie falschen Antworten auf.

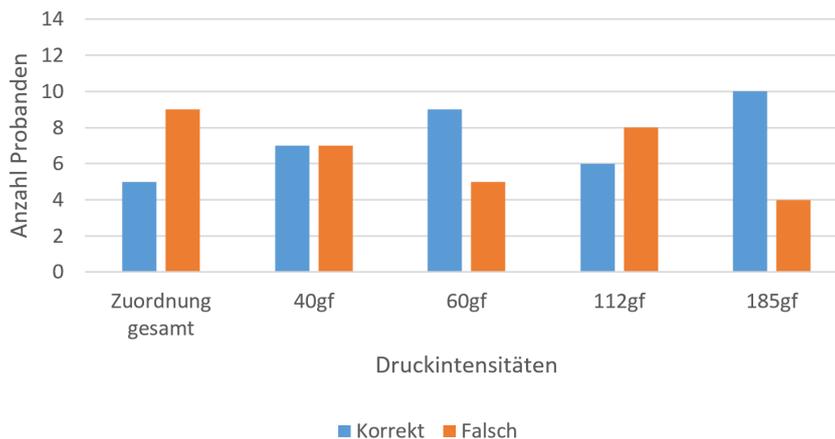


Abbildung 42: Unterscheidung der unterschiedlichen Druckintensitäten in ihrer Häufigkeit.

Insgesamt 5 von 14 (35.7%) Teilnehmern konnten die Reihenfolge korrekt wiedergeben. 10 von 14 (71.4%) Teilnehmern haben den höchsten Druck als diesen erkannt. Zwischen den drei schwächeren Druckstärken konnten sich Probanden nur sehr schwer festlegen. Während bei einer Kraft von 60gf 9 von 14 Probanden den Druck richtig einsortiert hatten, hatte bei 40gf die Hälfte der Teilnehmer die Zuordnung korrekt eingeschätzt und bei der Kraft von 112gf waren es sogar nur 6 der 14 (42.9%) Teilnehmer. In der [Abbildung 43](#) werden die Häufigkeiten der Unterscheidung unterschiedlicher Druckstärken auf das Geschlecht verteilt. Während bei den weiblichen Probanden der schwächste Druck von 5 aus 8 (62.5%) Probanden korrekt identifiziert wurde, so ist es bei den männlichen Probanden lediglich 2 von 6 (33.3%).

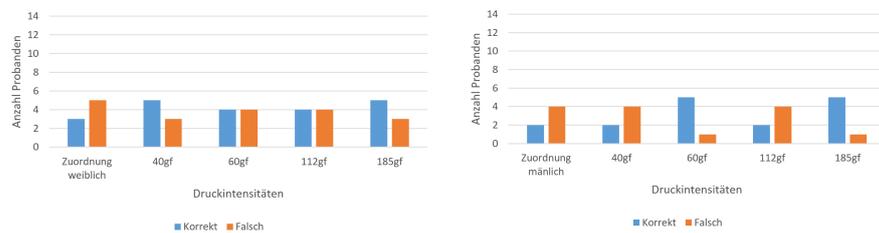


Abbildung 43: Unterscheidung der unterschiedlichen Druckintensitäten separiert nach Geschlecht, weiblich auf der linken und männlich auf der rechten Seite.

Während der Ausführung der Aufgabe 1.1 konnte oftmals ein Zucken der Probanden wahrgenommen werden. Nach Rückfrage waren einige einfach überrascht über das Spüren des Drucks auf ihrer Fingerkuppe.

Bei der zweiten Unteraufgabe sollten Probanden unterschiedliche Druckverläufe identifizieren und diese den Bezeichnungen *sehr stark* zu *sehr schwach*, *sehr schwach* zu *sehr stark*, *stark* zu *schwach* und *schwach* zu *stark* zuordnen. Entgegen den Ergebnissen aus der ersten Unteraufgabe, konnten Teilnehmer die Verläufe sehr gut einordnen (siehe [Abbildung 44](#). 12 von 14 (85.7%) Probanden haben die Verläufe korrekt zugeordnet. Bei Aufsteigenden Verläufen (*sehr schwach* zu *sehr stark* und *schwach* zu *stark*) konnten 13 von 14 Probanden den Verlauf korrekt identifizieren, bei den Entgegengesetzten Verläufen waren es jeweils 12 von 14 Probanden.

Nach Aufteilung der Zuordnungen nach Geschlecht (siehe [Abbildung 45](#)), konnte festgestellt werden, dass alle weiblichen Teilnehmer die Zuordnung der Verläufe korrekt vollzogen (8 von 8 Teilnehmerinnen). Bei den männlichen Teilnehmern waren es 4 von 6.

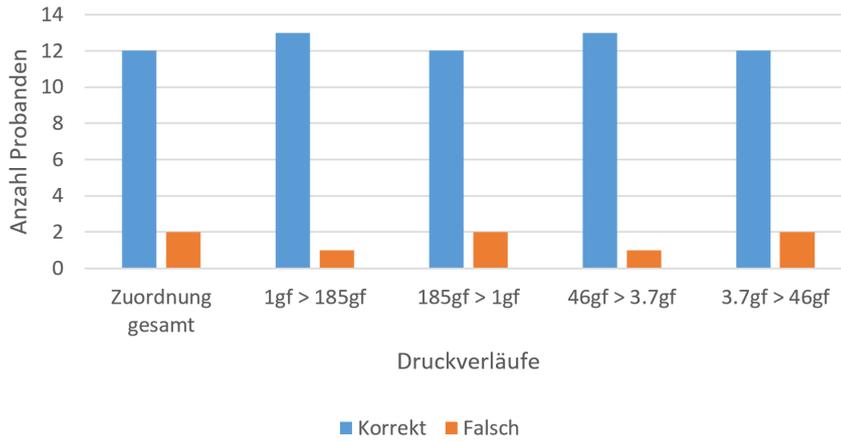


Abbildung 44: Zuordnung der unterschiedlichen Druckverläufe in ihrer Häufigkeit.

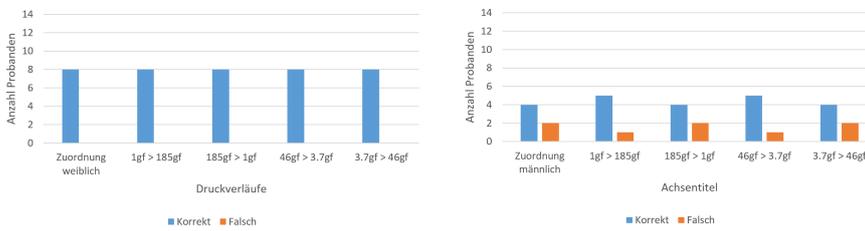


Abbildung 45: Zuordnung der unterschiedlichen Druckverläufe separiert nach Geschlecht, weiblich auf der linken und männlich auf der rechten Seite.

Bei der dritten Unteraufgabe sollten Probanden Vibrationen wahrnehmen und ihre individuelle Vorliebe benennen. Hierbei wurde von fünf Probanden die Alternierung zwischen 3.7gf und 6.2gf als angenehm benannt. Die anderen Vibrationen waren unter den anderen Probanden gleichmäßig verteilt auf der Favoritenliste (jeweils 3 pro Vibration).

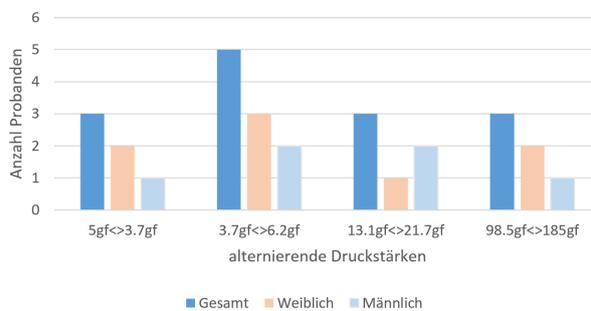


Abbildung 46: Favorisierte Vibrationstypen nach ihrer Häufigkeit.

5.5.3 Auswertung der zweiten Aufgabe

Zur Auswertung der Messdaten wurde eine einfaktorielles Varianzanalyse (ANOVA) mit Messwiederholungen angewendet. Hierbei wurde eine Signifikanz bei der Messung der Distanz zum Erzielten Objekt ($F_{2,26} = 5.600$, $p < 0.01$) bei $\alpha = 0.05$ (Irrtumswahrscheinlichkeitsniveau) festgestellt. Durch Post-hoc t-Tests nach einer Bonferroni-Anpassung der Mehrfachvergleiche, konnten zwei signifikante Unterschiede identifiziert werden. Zum einen haben Teilnehmer der Studie eine geringere Fehlerdistanz bei der direkten Haptik gegenüber der VisuaOnly Bedingung erzielt ($p = 0.011$). Zum anderen wurde des weiteren auch eine geringere Fehlerdistanz bei der FluidHaptics Bedingung erzielt ($p = 0.032$). [Abbildung 47](#) stellt die Ergebnisse im Diagramm dar.

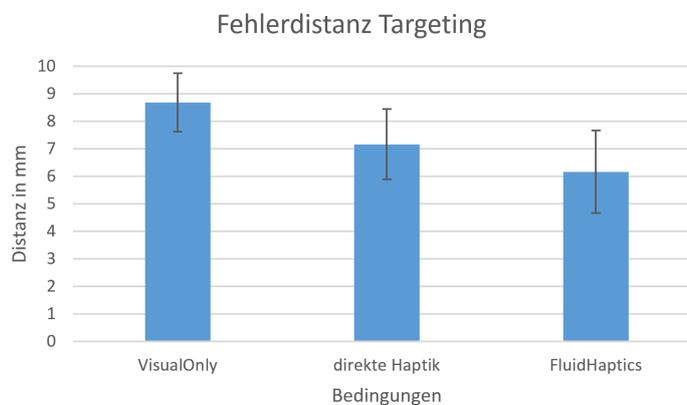


Abbildung 47: Probanden hatten eine durchschnittliche Fehlerdistanz unter VisualOnly Bedingungen bei 8.69 mm, bei der direkten Haptik war die Fehlerdistanz bei 7.16 mm und bei FluidHaptics Bedingungen bei 6.17 mm.

Zusätzlich zu der Distanz im dreidimensionalen Raum, wurden die Ergebnisse auch in planarer XY Ebene ausgewertet. Hierbei konnte keine Signifikanz festgestellt werden. Auf der Z-Achse jedoch, konnte eine Signifikanz unter den drei Bedingungen gemessen werden ($F_{2,26} = 13.352$, $p < 0.003$). Während man durch paarweise Vergleiche nach Bonferroni-Anpassung der Mehrfachvergleiche zwischen der VisuaOnly und der direkten Haptik keine Signifikanz erkennen konnte, so wurde eine Signifikanz bei der Fehlerdistanz zwischen der VisuaOnly und der FluidHaptics Systemen bestimmt ($p = 0.009$).

Ebenfalls auf der Z-Achse konnte eine Signifikanz zwischen der direkten Haptik und der FluidHaptics Bedingung identifiziert werden ($p = 0.011$). Hierbei hat FluidHaptics die Fehlerdistanz in der Z-Achse, verglichen mit der VisualOnly Bedingung um 61.5% gesenkt (von 2.3 mm auf 0.9 mm) (siehe [Abbildung 48](#) auf der rechten Seite). Auch zur direkten Haptik gab es eine nennenswerte Senkquote von 56% (von 2.0 mm auf 0.9 mm).

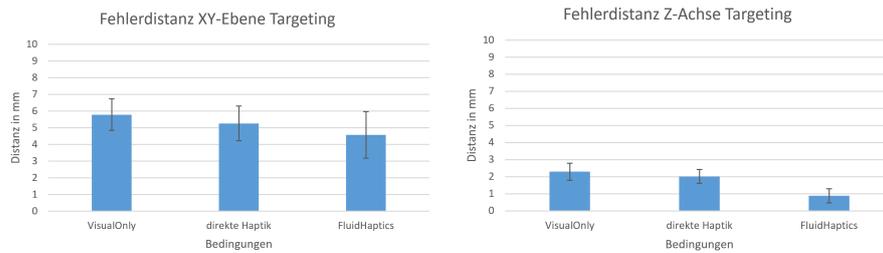


Abbildung 48: In der XY-Ebene konnten keine signifikanten Unterschiede erzielt werden (links). Jedoch hat FluidHaptics in der Targetingaufgabe in der Z-Achse eine signifikante Senkung der Fehlerdistanz hervorgebracht (rechts).

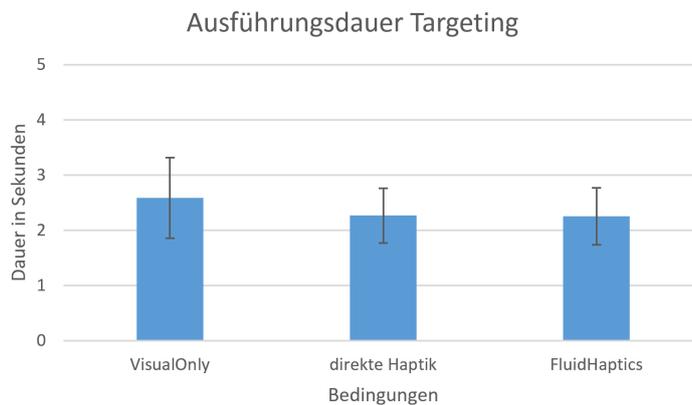


Abbildung 49: Teilnehmer der Studie benötigten unter den VisualOnly Bedingungen insignifikant länger für die einzelnen Durchführungen.

Ebenfalls wurde eine einfaktorielle ANOVA im Bezug auf die geloggte Ausführungszeit vollzogen. Es wurde zwar eine Signifikanz zwischen den Bedingungen festgestellt ($F_{2,26} = 3.392$, $p < 0.05$). Weitere Post-hoc t-Tests, mit Bonferroni-Korrektur der Gesamtfehlerrate, zeigten jedoch keine Signifikanz zwischen den Paaren (siehe [Abbildung 49](#)). Entgegen den Erwartungen sollte man jedoch trotzdem festhalten, dass die durchschnittliche Ausführungszeit ohne haptischen Feedback mit 2.58 Sekunden höher als mit haptischen Feedback (direkte Haptik = 2.27 sec., FluidHaptics = 2.26 sec) war.

5.5.4 Auswertung der dritten Aufgabe

Während in der Targetingaufgabe nur zwei Punkte im 3D-Raum verglichen wurden um die Distanz zwischen der Fingerkuppe und dem zu erzielenden Objekt zu messen, so wurde bei der Tracingaufgabe, stetig die Distanz von der Fingerkuppe des Probanden zum nächsten Punkt auf dem Pfad aufaddiert und nach der Durchführung ein arith-

metischer Mittelwert berechnet. Die Fehlerdistanzen wurden durch eine einfaktorische ANOVA mit Messwiederholungen auf die Signifikanz analysiert. Hierbei wurden signifikante Unterschiede zwischen den drei Bedingungen festgestellt ($F_{2,26} = 3.558$, $p < 0.05$) (siehe [Abbildung 50](#)).

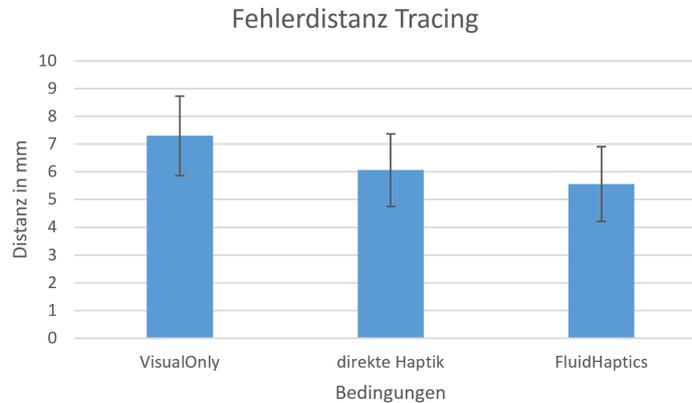


Abbildung 50: Bei der Tracingaufgabe hatten Teilnehmer unter VisualOnly Bedingungen eine Fehlerdistanz von 7.3 mm, unter direkter Haptik 6.1 mm und unter FluidHaptics 5.6 mm. ANOVA führte zur Feststellung einer Signifikanz.

Nach einem Bonferroni-korrigierten paarweisen Vergleich konnte eine Signifikanz zwischen der VisualOnly Bedingung und der FluidHaptics Bedingungen identifiziert werden ($p = 0.017$). Auch bei der Tracingaufgabe wurden die Fehlerdistanzen nicht nur im dreidimensionalen Raum, sondern auch in der XY-Ebene, sowie in die Tiefe, der Z-Achse, geloggt. In der XY-Ebene konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den drei Bedingungen festgestellt werden. In der Z-Achse jedoch wurde eine Signifikanz ermittelt ($F_{2,26} = 15.638$, $p < 0.0005$). In weiteren paarweisen Vergleichen nach einer Bonferroni-Anpassung ermittelte man signifikante Unterschiede in der Z Fehlerdistanz zwischen der VisualOnly Bedingung und der direkten Haptik ($p = 0.002$), sowie zwischen der VisualOnly Bedingung und der FluidHaptics Bedingung ($p = 0.0005$). Im Gegensatz zu der Targetingaufgabe konnte bei der Tracingaufgabe jedoch keine Signifikanz zwischen der direkten Haptik und der fluiden Haptik festgestellt werden (siehe [Abbildung 51](#) rechts).

FluidHaptics hat im Vergleich mit der VisualOnly Bedingung die Fehlerdistanz im 3D-Raum beim Tracing von 7.3 mm auf 5.6 mm um 1.7 mm (24%) gesenkt. In der Z-Achse hat FluidHaptics die Fehlerdistanz um 55% gesenkt (von 4.8 mm auf 2.1 mm). Der direkte haptische Druck hat bei der Z-Achse ebenfalls ein nennenswertes Resultat erzielt und senkte die Fehlerdistanz um 44% (von 4.8 mm auf 2.7 mm).

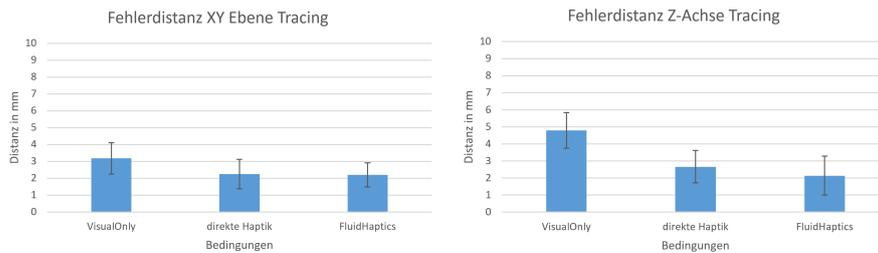


Abbildung 51: Analog zu den Ergebnissen aus der Targetingaufgabe, konnten in der XY Ebene keine signifikanten Unterschiede in der Fehlerdistanz gemacht werden, jedoch aber in der Z-Achse (rechts).

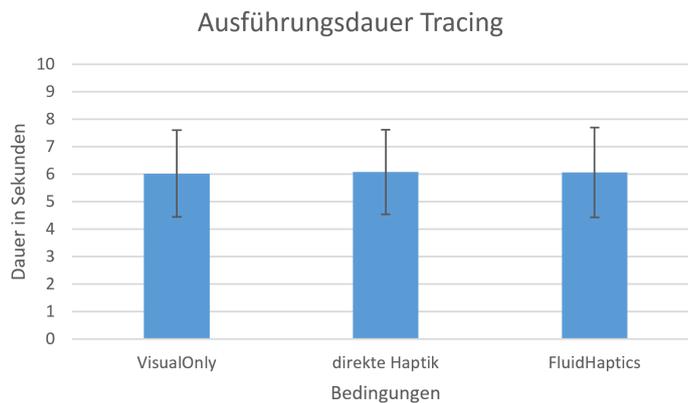


Abbildung 52: Die Ausführungsdauer der einzelnen Durchführungen ist nahezu identisch. Unter VisualOnly Bedingungen haben Probanden 6.03 sec. benötigt, bei direkter Haptik 6.08 sec und bei FluidHaptics 6.07 sec.

Auch die Ausführungsdauer wurde einer einfaktoriellen Varianzanalyse mit Messwiederholungen unterzogen. Die Differenz zwischen den Durchschnittszeiten war jedoch minimal, sodass keine Signifikanz ermittelt wurde.

5.5.5 Auswertung des User Experience Questionnaires

Mit Hilfe des Excel-Sheets zur Auswertung der Fragebögen konnte die subjektive Wahrnehmung gegenüber dem FluidHaptics System von allen Teilnehmern analysiert werden. Um Fehlinterpretationen zu vermeiden wurde vor der Auswertung eine Datenanalyse ausgeführt. Dabei musste ein Fragebogen von der Auswertung aufgrund von Inkonsistenzen bzw. Widersprüchen bei der Einschätzung ausgeschlossen werden.

Resultierend durch die Auswertung der 26 Wortpaare lässt sich das System anhand des User Experience Questionnaire mit 246 weiteren Anwendungen (Stand: 31.12.2016) vergleichen. Die Benchmark

Analyse verrät, dass 4 der 6 Kategorien im Exzellenten Bereich abgeschnitten haben (Bereich der besten 10% aller Systeme).

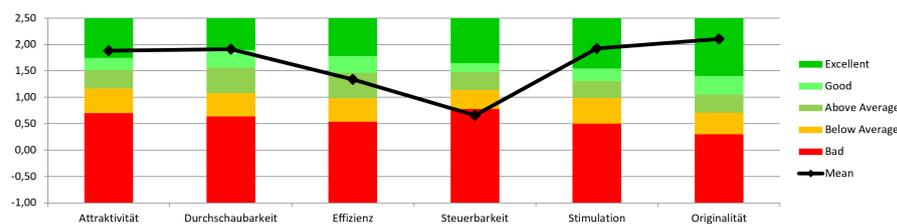


Abbildung 53: Die ermittelte Benchmark, verglichen mit 246 weiteren Studien mit insgesamt 9906 Probanden. Aufgeteilt in die Kategorien Attraktivität, Durchschaubarkeit, Effizienz, Steuerbarkeit, Stimulation und Originalität.

Dies sind die Kategorien Attraktivität ($M = 1.88$), Durchschaubarkeit ($M = 1.91$), Stimulation ($M = 1.93$) und Originalität ($M = 2.11$), wobei Stimulation und Originalität zu den hedonischen Qualitäten zählen und Durchschaubarkeit zu den pragmatischen Qualitäten. In der Kategorie Effizienz (1.34 Durchschnittspunkte) erreichte man den überdurchschnittlichen Bereich (25% aller Systeme sind besser, 50% sind schlechter). In der weiteren pragmatischen Qualitätskategorie Steuerbarkeit (0.66 Durchschnittspunkte) hat man ein schlechtes Ergebnis erzielt (unter den 25% der schlechtesten Ergebnisse). [Abbildung 53](#) stellt den Benchmark grafisch dar. Dieser Effekt lässt sich ebenfalls bei dem Vergleich aller Mittelwerte von allen Item-Paaren feststellen. Sowohl das Item-Paar *unberechenbar-voraussagbar* ($M = 0.2$), als auch das Paar *erwartungskonform-nicht erwartungskonform* ($M = 0.2$) wurde im Gegensatz zu den restlichen Paaren kontrovers beantwortet. Beide Paare gehören in die Kategorie Steuerbarkeit. Das Item-Paar *behindernd-unterstützend*, welches ebenfalls zur Kategorie der Steuerbarkeit gehört, sticht mit einem Mittelwert von 1.4 in dieser Kategorie besonders hervor.

Zusammengefasst hat das FluidHaptics System in der Attraktivität 1.88 Punkte, in der pragmatischen Qualität 1.30 Punkte und in der hedonischen Qualität 2.03 Punkte erreicht (siehe [Abbildung 54](#)).

5.6 DISKUSSION

Im vorangegangenen Abschnitt wurden die Studienergebnisse ausgearbeitet. Der folgende Abschnitt widmet sich der analytischen Diskussion der Ergebnisse, sowie der Verifizierung der Hypothesen. Darüber hinaus wird im Unterabschnitt das Fazit, in Anbetracht der gestellten Hypothesen, gezogen.

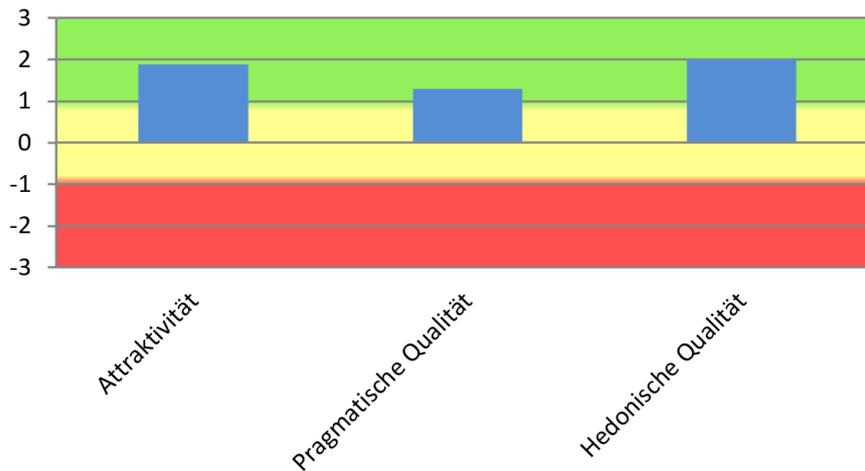


Abbildung 54: Die ermittelte durchschnittliche Punktzahl für das FluidHaptics System, aufgeteilt in drei Hauptkategorien Attraktivität, pragmatische Qualität und hedonische Qualität.

5.6.1 Interpretation der Ergebnisse

Anhand der Aufgaben innerhalb der Studie konnte die Funktionalität der FluidHaptics Lösung getestet werden. Insbesondere die Targeting- und Tracingaufgaben sollten den signifikanten Einfluss des dynamischen Drucks in Bezug auf Präzision untersuchen. Dies konnte man hinsichtlich der Tiefe (Z-Achse) erfolgreich bestätigen. Durch FluidHaptics waren Benutzer im Durchschnitt 57% genauer in ihren Ausführungen in der Tiefe. Die Ungenauigkeit der Interaktion innerhalb der VR, wird hauptsächlich durch die Überdeckung des Zielobjekts durch den animierten Arm hervorgerufen. Durch das haptische Feedback wird diese Überdeckung relativiert, da der Proband das Zielobjekt nicht nur visuell ortet, sondern auch taktil wahrnimmt.

Überraschenderweise ist die Ausführungsdauer trotz haptischen Feedback nicht merklich höher gemessen worden, sodass man sagen kann, dass die Art der taktilen Reize durch FluidHaptics die Performanz nicht beeinträchtigt.

Im folgenden werden die Hypothesen zuvor gestellten Hypothesen verifiziert:

- **H1:** Systeme mit haptischem Feedback führen zu einer höheren Genauigkeit beim Erzielen von Objekten und Abfahren von Pfaden, als Systeme ohne haptischem Feedback.

Diese Hypothese konnte für das Erzielen von Objekten vollständig angenommen werden. Sowohl durch direkte Haptik als auch durch dynamische Haptik (FluidHaptics) konnten Benutzer die Aufgaben signifikant präziser ausführen. Beim Nachfahren der Pfade konnte jedoch nur bei der dynamischen Haptik diese Hypothese angenommen werden. Folglich ist die Genau-

igkeit nicht ausschließlich durch jegliche Haptik zu steigern, sondern wie in diesem Fall aufgezeigt, spielt die Art des taktilen Reizes eine Rolle.

- **H₂:** *Dynamische Druckstärken durch FluidHaptics wird dazu führen, dass Nutzer die niedrigsten Fehlerraten produzieren, da die Penetrationstiefe bei Kollision der Fingerkuppe taktil erfahrbar gemacht wird.*

Diese Hypothese kann nicht komplett angenommen werden, da der dynamische Druck in der Tracingaufgabe keinen signifikanten Unterschied zu direkter Haptik erzielt hat. Dennoch kann man teilweise diese Hypothese annehmen, denn bei der Aufgabe zum Erzielen von Objekten konnte eine Signifikanz zwischen direkter Haptik und dynamischer Haptik bestimmt werden. Probanden waren im Durchschnitt um 1 mm genauer beim Ertasten der Objekte. In der Tiefe (z-Achse) konnte sogar ein Unterschied von 1.1 mm festgestellt werden (56% Senkungsquote gegenüber direkter Haptik).

- **H₃:** *Teilnehmer der Studie werden bei der Bedingung ohne jegliche Haptik (VisualOnly) die Ausführungen am schnellsten vollziehen, da sie sich ausschließlich auf die visuellen Kognition konzentrieren müssen.*

Die Performanz der Aufgaben hat ein überraschendes Ergebnis erzielt. Weder in der Targeting- noch in der Tracingaufgabe, konnte ein signifikanter Unterschied zwischen den drei unterschiedlichen Bedingungen erzielt werden. Während Probanden bei der Targetingaufgabe im Durchschnitt für alle drei Bedingungen 2.63 sec. ($SD = 0.19$ sec.) benötigten, wurde bei der Tracingaufgabe durchschnittlich 6.06 sec. ($SD = 0.03$ sec.) für eine Durchführung gemessen. Folglich muss diese Hypothese abgelehnt werden.

Die Auswertung des UEQ führte zu einem annehmbaren Benchmark, der vor allen Dingen in den hedonischen Qualitäten bei den Teilnehmern punkten konnte. Dies hat mitunter mit der eingesetzten VR-Technologie zu tun (VR Brille), mit der lediglich 3 von 14 Probanden zuvor Erfahrungen sammeln konnten, aber auch mit der Ermöglichung der taktilen Wahrnehmung beim Berühren von virtuellen Objekten. Zwei Probanden kommentierten während der Studie wie folgt: „man vermisst den haptischen Druck in der VR, wenn man ihn erst einmal gespürt hat“ (P₃ & P₁₁).

Hingegen waren pragmatische Qualitäten im mittleren Bereich anzusiedeln. Dies hatte mit der Kategorie Steuerbarkeit zu tun, die mit dem OptiTrack System zu tun hatte. Das Tracking von 6-DoF Bewegungen konnte mit sechs OptiTrack Kameras nicht immer flüssig realisiert werden. Manchmal wurden Marker nicht korrekt erkannt,

weil sie sich überlagert hatten. Dies führte zu irritierenden Bewegungen der animierten Hand innerhalb der VR. P7 hatte geäußert, dass „taktile Feedback irritieren kann, weil man dann beim Nachfahren der Pfade sich zwar sicher ist, dass man drauf ist, aber keine Haptik spürt“. Diese Wahrnehmung ist sehr konträr, da auch einige Probanden der Meinung waren, dass es ein enormer Mehrwert ist Objekte zu ertasten, die man eigentlich gar nicht sieht, weil sie von dem animierten Arm verdeckt sind (P2, P6, P12, P14).

5.7 LIMITATIONEN

Wie jedes System, hat auch FluidHaptics Limitationen, die während der Nutzerstudie erkannt wurden. Diese werden im Folgenden erläutert.

Durch den Einsatz von dem OptiTrack System zur Gestenerkennung im Raum, um diese in die VR zu überführen, wurden Markeraufbauten eingesetzt. Diese sind beim Tracken des Armes bei entsprechender Position aus der Position der Kameras überlappend erfasst worden und hatten somit keine genaue Arm/Hand Position an die VR Anwendung weitergegeben. Falls weiterhin OptiTrack eingesetzt werden sollte, so müssen viel mehr Kameras (sechs wurden in der Studie verwendet) auf die Markeraufbauten gerichtet sein. Während der Umsetzung des FluidHaptics Handschuh wurde zur Erkennung der Gesten die LeapMotion Technologie in einer Machbarkeitsstudie getestet. Diese führte zwar zu Erfolgen, jedoch ist das Trackingverfahren von LeapMotion nicht millimetergenau und durch die integrierte Interpolation im Erkennungsalgorithmus führt sie zu Verfälschungen. Die Erkennung ist zwar flüssiger, aber nicht genauer. Aus diesem Grund entschied man sich bei der Nutzerstudie für das präzisere OptiTrack.

Auch wenn FluidHaptics, im Vergleich zu verwandten Lösungen sehr leise ist, hört man bei einer bestimmten Intensität des Magnetfelds, wie das Eisenjoch den Elektromagnet berührt und leicht vibriert. Dieses Geräusch könnte man mit einer dünnen Isolierschicht aus Gummi womöglich reduzieren. Von Probanden wurde sehr hohe Ton als störend bzw. unangenehm wahrgenommen.

Die Druckstärke ist zwar sehr realitätsnah, jedoch beschränkt sich der Druck lediglich auf einen kleinen Teil der Fingerkuppe (1.8cm^2). Dies ist dem kleinen Loch in der FluidHaptics Kuppe geschuldet. Somit kann FluidHaptics ausschließlich einen Druck in eine Richtung ausüben. Nutzer haben angemerkt, dass es besser wäre, wenn der Druck an der obersten Seite der Fingerkuppe zu spüren wäre. Denn wenn Benutzer innerhalb der VR seinen Zeigefinger mit der vordersten Stelle gegen ein Objekt gestreckt hat, so erhielt er das taktile Feedback trotzdem an der Unterseite des Fingers.

Im vorhergehenden Kapitel wurde die gesamte Nutzerstudie zu FluidHaptics beleuchtet. Messungen wurden ausgewertet und zuletzt diskutiert. Im diesem Kapitel wird ein Fazit gezogen und das Resultat den im [Abschnitt 2.5](#) definierten Anforderungen gegenübergestellt. Es wird erläutert in welchem Grad die Anforderungen an das System erfüllt sind. Zuletzt wird ein Ausblick auf den weiteren Forschungsbedarf geboten.

6.1 SCHLUSSFOLGERUNG

Anhand der Nutzerstudie konnte der Effekt eines dynamischen taktilen Feedbacks erfolgreich gemessen werden. Der enorm wichtige Druckstärkenverlauf zur realitätsnahen Wahrnehmung des Erfassens von Objekten [35], konnte anhand des Versuchsaufbaus FluidHaptics realisiert werden. Probanden haben in der Nutzerstudie unterschiedliche Verläufe korrekt erkannt und subjektiv als angenehm wahrgenommen.

Überraschenderweise wurde bei der Ausführungsdauer keine Signifikanz festgestellt, sodass diese Form des taktilen Feedbacks sich offenbar von den verwandten Arbeiten unterscheidet. Bei der verwandten Arbeit NormalTouch von Benko et al. [2] wurde ein signifikanter Unterschied in der Dauer bei der Ausführung von Targetingaufgaben festgestellt. Wahrscheinlich spielt deren recht klobiger Aufbau des Controllers in diesem Fall die maßgebliche Rolle für diesen Effekt. Das Gewicht als Faktor kann ausgeschlossen werden, da Probanden während der gesamten Tests, den Controller in der Hand hielten.

Die Druckstärke wurde von Teilnehmern als realistisch wahrgenommen. Mit der durchschnittlich maximalen Stärke von 185 gf bietet FluidHaptics eine annähernd so hohe Druckstärke, die beim Anheben eines 250 g Objekts auf die Fingerkuppe wirken (siehe [Unterunterabschnitt 2.1.2.2](#)). Laut Westling und Johannson [65] sind es bei 250g ca. $2 \text{ N} = \sim 203.9 \text{ gf}$.

Das modulare Stecksystem mit drei unterschiedlich großen Fingerkuppen hat sich bewährt und passte allen 14 Teilnehmern, wobei alle drei Größen benötigt wurden. Des weiteren sind die Fingeraufbauten von der Größe und dem Gewicht als akzeptabel kommentiert worden.

Die Haptik ist ein wesentlicher Bestandteil der Immersionskriterien innerhalb der VR. Durch die dynamischen Druckstärke, die sich ab-

hängig von der Penetrationstiefe gegen die Fingerkuppe wirkt, bietet FluidHaptics eine realitätsnahe taktile Reizung, die womöglich die Immersion steigert. Hierzu müssen weitere Tests im Bezug auf das Nutzungserlebnis eruiert werden.

Die folgende [Tabelle 9](#) zeigt definierten Anforderungen aus [Abschnitt 2.5](#) auf und kennzeichnet diese bzgl. ihrer Erfüllung.

	Gestenerkennung	Härte- / Weichheitsgrade	Visuelle Kohärenz	Greifinteraktion	Freie Interaktion
FluidHaptics	O	✓	✓	O	✓

Tabelle 9: Gegenüberstellung des FluidHaptics Systems zu den definierten Anforderungen (??) (✓ = wird erfüllt, X = wird nicht erfüllt, O = wird grundsätzlich erfüllt, erfordert weitere Entwicklung)

Drei Anforderungen wurden vollständig erfüllt, wohingegen zwei eine weitere Entwicklung zur vollen Erfüllung erfordern. Es wurde sichergestellt, dass unterschiedliche *Härte- und Weichheitsgrade* simuliert werden können. In der Studie konnte eine Signifikanz im Bezug auf die Präzision durch einen Druckstärkenverlauf von hart zu weich ermittelt werden. Die *visuelle Kohärenz* ist durch die serielle Kommunikation zwischen FluidHaptics Platine und Anwendung sichergestellt (Reaktionszeit < 30ms) und wurde von Probanden ebenfalls bestätigt. Während der Benutzung des FluidHaptics Handschuhs haben Benutzer keinerlei Einschränkungen ausgehend von FluidHaptics. Die Einschränkungen bei der *freien Interaktion* der Benutzer gehen von der Oculus Rift Brille sowie dem OptiTrack System aus, sind jedoch für die aktuellen Anwendungen als annehmbar zu betiteln.

Die *Gestenerkennung*, sowie die *Greifinteraktion* wird als nicht vollständig erfüllt gekennzeichnet, da lediglich in einer Machbarkeitsstudie die Greifbewegung durch eine LeapMotion als erfolgreich eingestuft wurde. Während der Studie entschied man sich für die genauere Erkennungsmethode (OptiTrack), da die Präzision im Vordergrund stand. Die Greifbewegung durch das OptiTrack System zu realisieren erfordert eine Vielzahl an IR-Kameras, die nicht zur Verfügung standen. Ergo, besteht bei der Gestenerkennung und Greifinteraktion weiterer Entwicklungsbedarf, der durch Anpassung der Erkennungsalgorithmen von LeapMotions Orion zu bewerkstelligen ist.

6.2 AUSBLICK

Weiterer Forschungsbedarf ist bei dieser Masterarbeit auf unterschiedlichen Ebenen zu finden. Zum einen kann die aktuell verwendete Flüssigkeit im FluidHaptics Aufbau durch ERF ersetzt werden, um die Änderung der Viskosität noch intensiver fühlbar zu machen. Ausgehend aus diesem Ansatz können kleinere Flüssigkeitspads elektronisch angesteuert werden und vielfältige Texturen fühlbar gemacht werden.

FluidHaptics hat die Eigenschaften Druck *und* Vibration zu erzeugen. Ein nächster Schritt, wäre zusätzlich zum Druck, abhängig von der Bewegung der Hand mit Vibrationen die Fingerkuppe zu reizen. Ein Nutzer könnte beim Ergreifen eines virtuellen Objekts einen Druck spüren, beim Reiben eines virtuellen Objekts jedoch eine Vibration. Bisherige Realisierungen bieten lediglich nur eine der beiden Varianten an. FluidHaptics könnte beides in einem bieten.

Aktuell hängt die Druckstärke ausschließlich von der Kollision der Fingerkuppe mit einem Objekt innerhalb der VR oder AR Anwendung ab. Zusätzlich könnten Daten durch das Erfassen der Muskelanspannung des Unterarms, bspw. durch das Myo Armband, als Inputfaktor für die Intensität des Druckes verantwortlich sein. Anhand dieser Information könnte ein virtuelles Gewicht simuliert werden. Sofern ein virtuell schweres Objekt in der VR angehoben wird, muss der Benutzer nicht nur mit den Fingern tief in das Objekt greifen, sondern zusätzlich seinen Unterarm anspannen. Falls die Anspannung zu niedrig ist, würde das virtuelle Objekt durch die virtuellen Finger gleiten und auf den virtuellen Boden fallen.

Um FluidHaptics in unterschiedlichen Spielen einzusetzen könnte ein Kompatibilitätslayer entwickelt werden, der bspw. als Unity3D Plugin in diverse Projekte integriert werden könnte, um diverse VR oder AR Anwendungen durch FluidHaptics immersiver zu machen.

LITERATUR

- [1] Yoseph Bar-Cohen, Constantinos Mavroidis, Mourad Bouzit, Benjamin P Dolgin, Deborah L Harm, George E Kopchok und Rodney A White. "Virtual reality robotic telesurgery simulations using MEMICA haptic system". In: *SPIE's 8th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials*. International Society for Optics und Photonics. 2001, S. 357–363.
- [2] Hrvoje Benko, Christian Holz, Mike Sinclair und Eyal Ofek. "NormalTouch and TextureTouch: High-fidelity 3D Haptic Shape Rendering on Handheld Virtual Reality Controllers". In: *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*. ACM. 2016, S. 717–728.
- [3] Mourad Bouzit, Grigore Burdea, George Popescu und Rares Borian. "The Rutgers Master II-new design force-feedback glove". In: *IEEE/ASME Transactions on mechatronics 7.2* (2002), S. 256–263.
- [4] Grigore C Burdea. "Haptic feedback for virtual reality". In: *Proceedings of the Virtual Reality and Prototyping Workshop*. Citeseer. 1999.
- [5] J David Carlson. "What makes a good MR fluid?" In: *Journal of intelligent material systems and structures 13.7-8* (2002), S. 431–435.
- [6] J David Carlson, DM Catanzarite und KA St. Clair. "Commercial magneto-rheological fluid devices". In: *International Journal of Modern Physics B 10.23n24* (1996), S. 2857–2865.
- [7] Tom Carter, Sue Ann Seah, Benjamin Long, Bruce Drinkwater und Sriram Subramanian. "UltraHaptics: multi-point mid-air haptic feedback for touch surfaces". In: *Proceedings of the 26th annual ACM symposium on User interface software and technology*. ACM. 2013, S. 505–514.
- [8] Inrak Choi und Sean Follmer. "Wolverine: A Wearable Haptic Interface for Grasping in VR". In: *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*. ACM. 2016, S. 117–119.
- [9] Mark R Cutkosky. "On grasp choice, grasp models, and the design of hands for manufacturing tasks". In: *IEEE Transactions on robotics and automation 5.3* (1989), S. 269–279.

- [10] Thomas Feix, Roland Pawlik, Heinz-Bodo Schmiedmayer, Javier Romero und Danica Kragic. "A comprehensive grasp taxonomy". In: *Robotics, Science and Systems: Workshop on Understanding the Human Hand for Advancing Robotic Manipulation*. 2009, S. 2–3.
- [11] George W. Fitzmaurice, Hiroshi Ishii und William Buxton. *Bricks: Laying the Foundations for Graspable User Interfaces*. Published in the ACM Proceedings of CHI'95, S. 442–449.
- [12] H. Flechtner, N. Peters, K. Roetsch, F. Schramm, R. Pollhammer, T. Kaefer, S. Loeschner, H. Heltmann und W.M. Horne. *Hydraulisch dämpfendes Aggregatlager*. DE Patent App. DE1,997,118,678. 1998. URL: <https://www.google.com/patents/DE19718678A1?cl=de>.
- [13] Inge Flehmig. *Normale Entwicklung des Säuglings und ihre Abweichungen: Früherkennung und Frühbehandlung*. Georg Thieme Verlag, 2007.
- [14] Jonas Forsslund, Michael Yip und Eva-Lotta Sallnäs. "Wooden-Haptics: A Starting Kit for Crafting Force-Reflecting Spatial Haptic Devices". In: *Proceedings of the Ninth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*. ACM. 2015, S. 133–140.
- [15] Esther P Gardner und John H Martin. "Coding of sensory information". In: *Principles of neural science 4* (2000), S. 411–429.
- [16] Leonid R Gavrilov, Grigoryi V Gersuni, Oleg B Ilyinski, Efim M Tsirulnikov und Eugenyi E Shchekanov. "A study of reception with the use of focused ultrasound. I. Effects on the skin and deep receptor structures in man". In: *Brain research* 135.2 (1977), S. 265–277.
- [17] *GloveOne User Guidelines*. <https://www.neurodigital.es/gloveone/developer/doc/user-guide/>. abgerufen am 09.09.2016.
- [18] Xiaochi Gu, Yifei Zhang, Weize Sun, Yuanzhe Bian, Dao Zhou und Per Ola Kristensson. "Dexmo: An Inexpensive and Lightweight Mechanical Exoskeleton for Motion Capture and Force Feedback in VR". In: *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. ACM. 2016, S. 1991–1995.
- [19] Taku Hachisu und Masaaki Fukumoto. "VacuumTouch: attractive force feedback interface for haptic interactive surface using air suction". In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. ACM. 2014, S. 411–420.
- [20] Christian Hick und Astrid Hick. *Intensivkurs Physiologie*. Elsevier, Urban & Fischer, 2012.

- [21] Takayuki Hoshi und Hiroyuki Shinoda. "A sensitive skin based on touch-area-evaluating tactile elements". In: *2006 14th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*. IEEE. 2006, S. 89–94.
- [22] M. Hundt, G. Poetsch und R. Legierski. *Aktives Dämpferlager*. DE Patent App. DE201,410,115,613. 2016. URL: <https://www.google.com/patents/DE102014115613A1?cl=de>.
- [23] Jens Huppelsberg und Kerstin Walter. *Kurzlehrbuch physiologie*. Georg Thieme Verlag, 2013.
- [24] Hiroshi Ishii und Brygg Ullmer. *Tangible Bits: Towards Seamless Interfaces Between People, Bits and Atoms*. Published in the ACM Proceedings of CHI'97, S. 234–241.
- [25] Takayuki Iwamoto, Mari Tatzono, Takayuki Hoshi und Hiroyuki Shinoda. "Airborne ultrasound tactile display". In: *ACM SIGGRAPH 2008 new tech demos*. ACM. 2008, S. 1.
- [26] Steve Jacobsen, E Iversen, D Knutti, R Johnson und K Biggers. "Design of the Utah/MIT dextrous hand". In: *Robotics and Automation. Proceedings. 1986 IEEE International Conference on*. Bd. 3. IEEE. 1986, S. 1520–1532.
- [27] Yvonne Jansen, Thorsten Karrer und Jan Borchers. "MudPad: tactile feedback and haptic texture overlay for touch surfaces". In: *ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces*. ACM. 2010, S. 11–14.
- [28] Lynette A Jones und Susan J Lederman. *Human hand function*. Oxford University Press, 2006.
- [29] Ibrahim A Kapandji. *Funktionelle Anatomie der Gelenke: schematisierte und kommentierte Zeichnungen zur menschlichen Biomechanik; einbändige Ausgabe-obere Extremität, untere Extremität, Rumpf und Wirbelsäule*. Georg Thieme Verlag, 2009.
- [30] Adam Kendon. *Gesture: Visible action as utterance*. Cambridge University Press, 2004.
- [31] Daniel Klinkhammer und Harald Reiterer. *Blended Museum – Enhancing Visitor Experience through Interaction and Information Design*. EVA - Electronic and Visual Arts 2009. Berlin, Deutschland, 2009.
- [32] Jochen Köhnlein. "Smart Materials-Intelligente Werkstoffe". In: *Stahlbau* 69.6 (2000), S. 430–440.
- [33] CyberGloveSystems LLC. *Cybergrasp*. 2016. URL: www.cyberglovesystems.com/cybergrasp/ (besucht am 30. 10. 2016).
- [34] Bettina Laugwitz, Theo Held und Martin Schrepp. "Construction and evaluation of a user experience questionnaire". In: *Symposium of the Austrian HCI and Usability Engineering Group*. Springer. 2008, S. 63–76.

- [35] Susan J Lederman und Roberta L Klatzky. "Hand movements: A window into haptic object recognition". In: *Cognitive psychology* 19.3 (1987), S. 342–368.
- [36] Richard Q Van der Linde, Piet Lammertse, Erwin Frederiksen und B Ruiter. "The HapticMaster, a new high-performance haptic interface". In: *Proc. Eurohaptics*. 2002, S. 1–5.
- [37] I Scott MacKenzie. "Fitts' law as a research and design tool in human-computer interaction". In: *Human-computer interaction* 7.1 (1992), S. 91–139.
- [38] Ville Makinen, Petro Suvanto und Jukka Linjama. *Method and apparatus for sensory stimulation*. US Patent 7,924,144. 2011.
- [39] Yasutoshi Makino, Yoshikazu Furuyama und Hiroyuki Shinoda. "HaptoClone (Haptic-Optical Clone): Mid-air Haptic-Optical Human-Human Interaction with Perfect Synchronization". In: *Proceedings of the 3rd ACM Symposium on Spatial User Interaction*. ACM. 2015, S. 139–139.
- [40] Thomas H. Massie und J. K. Salisbury. "The PHANToM haptic interface: A device for probing virtual objects". In: *Proceedings of the ASME Dynamic Systems and Control Division*. 1994, S. 295–301.
- [41] Constantinos Mavroidis, Yoseph Bar-Cohen und Mourad Bouzit. "Haptic interfaces using electrorheological fluids". In: *Electroactive Polymer Actuators as Artificial Muscles: Reality, Potentials, and Challenges* (2001), S. 567–594.
- [42] Constantinos Mavroidis, Charles Pfeiffer, J Celestino und Yoseph Bar-Cohen. "Controlled compliance haptic interface using electrorheological fluids". In: *SPIE's 7th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials*. International Society for Optics und Photonics. 2000, S. 300–310.
- [43] Paul Milgram und Fumio Kishino. "A taxonomy of mixed reality visual displays". In: *IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems* 77.12 (1994), S. 1321–1329.
- [44] Suranga Nanayakkara, Elizabeth Taylor, Lonce Wyse und S H Ong. "An enhanced musical experience for the deaf: design and evaluation of a music display and a haptic chair". In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. ACM. 2009, S. 337–346.
- [45] Fiona N Newell, Marc O Ernst, Bosco S Tjan und Heinrich H Bülthoff. "Viewpoint dependence in visual and haptic object recognition". In: *Psychological science* 12.1 (2001), S. 37–42.
- [46] A. OHLETZ und W. Michel. *Kraftfahrzeug mit verbesserter Radbewegungs-dämpfung*. DE Patent 102,008,006,187. 2015. URL: <https://www.google.com/patents/DE102008006187B4?cl=de>.

- [47] Allison M Okamura, Jack T Dennerlein und Robert D Howe. "Vibration feedback models for virtual environments". In: *Robotics and Automation, 1998. Proceedings. 1998 IEEE International Conference on*. Bd. 1. IEEE. 1998, S. 674–679.
- [48] Abdul-Ghani Olabi und Artur Grunwald. "Design and application of magneto-rheological fluid". In: *Materials & design* 28.10 (2007), S. 2658–2664.
- [49] Bong Jun Park, Fei Fei Fang und Hyoung Jin Choi. "Magnetorheology: materials and application". In: *Soft Matter* 6.21 (2010), S. 5246–5253.
- [50] Robert William Phillips. "Engineering applications of fluids with a variable yield stress". Diss. University of California, Berkeley, 1969.
- [51] Ramesh Raskar, Greg Welch, Matt Cutts, Adam Lake, Lev Ste-sin und Henry Fuchs. "The office of the future: A unified approach to image-based modeling and spatially immersive displays". In: *Proceedings of the 25th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. ACM. 1998, S. 179–188.
- [52] Maria Rauschenberger, Martin Schrepp und Jörg Thomaschewski. "User Experience mit Fragebögen messen – Durchführung und Auswertung am Beispiel des UEQ". In: *Tagungsband UP13*. Hrsg. von Henning Brau, Andreas Lehmann, Kostanija Petrovic und Matthias C. Schroeder. Stuttgart: German UPA e.V., 2013, S. 72–77.
- [53] Jun Rekimoto und Masanori Saitoh. "Augmented surfaces: a spatially continuous work space for hybrid computing environments". In: *Proceedings of the SIGCHI conference on Human Factors in Computing Systems*. ACM. 1999, S. 378–385.
- [54] Nicola Sgambelluri, Enzo P Scilingo, Rocco Rizzo und Antonio Bicchi. "A free-hand haptic interface based on magnetorheological fluids". In: *The Sense of Touch and its Rendering*. Springer, 2008, S. 155–178.
- [55] SmartTec. *SmartTec ERF*. 2016. URL: <http://www.smarttec.co.uk/res/ERF%20Price%20list%2009-2009.pdf> (besucht am 30. 11. 2016).
- [56] Rajinder Sodhi, Ivan Poupyrev, Matthew Glisson und Ali Israr. "AIREAL: interactive tactile experiences in free air". In: *ACM Transactions on Graphics (TOG)* 32.4 (2013), S. 134.
- [57] P Ström, Leif Hedman, L Särnå, A Kjellin, T Wredmark und L Felländer-Tsai. "Early exposure to haptic feedback enhances performance in surgical simulator training: a prospective randomized crossover study in surgical residents". In: *Surgical endoscopy and other interventional techniques* 20.9 (2006), S. 1383–1388.

- [58] Ivan E Sutherland. "A head-mounted three dimensional display". In: *Proceedings of the December 9-11, 1968, fall joint computer conference, part I*. ACM. 1968, S. 757–764.
- [59] Geomagic Touch. *Geomagic*. 2016. URL: <http://www.geomagic.com/de/products/phantom-omni/overview> (besucht am 30. 10. 2016).
- [60] Dzmitry Tsetserukou, Katsunari Sato und Susumu Tachi. "ExoInterfaces: novel exoskeleton haptic interfaces for virtual reality, augmented sport and rehabilitation". In: *Proceedings of the 1st Augmented Human International Conference*. ACM. 2010, S. 1.
- [61] Voodoo. *Hand Physics Controller at Unity3d AssetStore*. 2016. URL: <https://www.assetstore.unity3d.com/en/#!/content/21105> (besucht am 30. 11. 2016).
- [62] *VR-Handschuhe der Studentengruppe der Rice University*. <http://news.rice.edu/2015/04/22/gamers-feel-the-glove-from-rice-engineers-2/>. abgerufen am 14.10.2016.
- [63] Sidney Weinstein. "Intensive and extensive aspects of tactile sensitivity as a function of body part, sex and laterality". In: *the First Int'l symp. on the Skin Senses, 1968*. 1968.
- [64] Malte Weiss, Chat Wacharamanotham, Simon Voelker und Jan Borchers. "FingerFlux: near-surface haptic feedback on tabletops". In: *Proceedings of the 24th annual ACM symposium on User interface software and technology*. ACM. 2011, S. 615–620.
- [65] G Westling und RS Johansson. "Factors influencing the force control during precision grip". In: *Experimental Brain Research* 53.2 (1984), S. 277–284.
- [66] Raphael Wimmer. "Grasp-sensitive surfaces". Diss. LMU, 2015.
- [67] Scott H Winter und Mourad Bouzit. "Use of magnetorheological fluid in a force feedback glove". In: *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering* 15.1 (2007), S. 2–8.
- [68] Hiroaki Yano, Shoichiro Taniguchi und Hiroo Iwata. "Shape and friction recognition of 3D virtual objects by using 2-DOF indirect haptic interface". In: *World Haptics Conference (WHC), 2015 IEEE*. IEEE. 2015, S. 202–207.

Teil III

ANHANG

A

STUDIENUNTERLAGEN

Im Anhang A finden sich diverse Dokumente, die im Zuge der Erhebung und Evaluierung der Studie erstellt und den Probanden vorgelegt wurden. Diese sind:

- Einführungsschreiben
- Einverständniserklärung
- Demografischer Fragebogen
- User Experience Questionnaire (Deutsch)

Einleitung

Hallo lieber Studienteilnehmer,

vielen Dank, dass Sie sich bereit erklärt haben mich bei meiner Master-Thesis zu unterstützen.

In dieser Studie wird es darum gehen ein System unter drei unterschiedlichen Bedingungen zu testen. Während dieser Studiensitzung werden drei unterschiedliche Aufgaben auf Sie zukommen, die ihnen jeweils vorher genau erklärt werden. Nach der Ausführung dieser Aufgaben erhalten Sie einen Fragebogen zur Beurteilung ihrer Benutzererfahrung. Die Studie dauert ungefähr 60 Minuten.

Ich will, bevor wir anfangen, ganz deutlich festhalten, dass nicht Sie, sondern die Systeme getestet werden. Sie können hier keine Fehler machen. Sie können nur Vor- und Nachteile des Systems aufzeigen.

Falls Sie sich nicht wohlfühlen sollten, können Sie zu jeder Zeit die Studie abbrechen oder eine Pause machen. Ich bitte Sie mir dies im gegebenen Fall einfach kurz mitzuteilen.

Wenn Sie während der Studie irgendwelche Fragen haben, dann stellen Sie diese bitte einfach. Es kann jedoch möglich sein, dass ich sie Ihnen nicht sofort beantworten kann, weil ich in manchen Fällen daran interessiert bin was passiert, wenn Ihnen niemand als Hilfe zur Verfügung steht.

Mit Ihrer Zustimmung werde ich den Verlauf der Studie aufzeichnen und mitprotokollieren. Die Aufzeichnungen und Notizen werden ausschließlich zur Auswertung, Dokumentation und Präsentation im wissenschaftlichen Rahmen verwendet.

Wenn Sie nichts dagegen haben, werde ich Sie bitten ein einfaches Formular zum Einverständnis zu unterschreiben.

Haben Sie zum weiteren Ablauf noch Fragen?

Formular für die Zustimmung zur Aufzeichnung und Verwendung von Teilnehmerdaten

Vielen Dank, dass Sie mir bei meinen Untersuchungen zum Thema *FluidHaptics – Taktilen Feedback für Greif-Interaktionen in Mixed-Reality Anwendungen* behilflich sind.

Ich werde diese Sitzung mit Ihnen aufzeichnen, um den Test im Nachhinein besser nachvollziehen zu können. Die Aufzeichnung wird sich aus Bild, Ton, Notizen und der automatisierten Protokollierung durch das getestete System zusammensetzen. Vor und während der Studie werde ich Sie bitten zwei Fragebögen auszufüllen.

Ihre Daten, werden ausschließlich im Rahmen meiner Masterarbeit, sowie eventueller weiterer wissenschaftlicher Arbeiten ausgewertet, dokumentiert und präsentiert. Die Daten werden keinem weiteren Zweck zugeführt. Ebenfalls werden Sie an keiner Stelle namentlich genannt. Es ist möglich, dass Teile der Aufzeichnungen zur Präsentation des Studienaufbaus und der Ergebnisse, im wissenschaftlichen Rahmen, eingesetzt werden.

Bitte lesen Sie die folgenden Aussagen durch und unterschreiben Sie dann.

Ich bin darüber informiert worden, dass meine Studiensitzung aufgezeichnet wird (Bild, Ton und automatische Protokollierungen durch die getesteten Systeme) und während der Sitzung Notizen durch den Studienleiter angefertigt werden.

Ich erlaube hiermit Herrn Alexander Schönhals oben genannte Aufzeichnungen, im Rahmen der Studie ausgefüllte Fragebögen, sowie Aufschriebe in Bezug zu durchgeführten Interviews, zum Zweck der wissenschaftlichen Untersuchung, Dokumentation und Präsentation zu verwenden.

Proband:

Unterschrift: _____

Name in Blockbuchstaben: _____

Ort und Datum: _____

Studienleiter:

Unterschrift: _____

Name in Blockbuchstaben: _____

Ort und Datum: _____

FluidHaptics Experiment

ID: _____

Teilnehmerbogen

Datum: _____

Geburtsdatum: _____

Geschlecht: weiblich männlich

Größe: _____

Beruf: _____

Herzschrittmacher: Ja Nein

VR Erfahrung: Ja Nein

Primäre Hand: Rechts: Links: Beide:

Bitte geben Sie Ihre Beurteilung ab.

Um das Produkt zu bewerten, füllen Sie bitte den nachfolgenden Fragebogen aus. Er besteht aus Gegensatzpaaren von Eigenschaften, die das Produkt haben kann. Abstufungen zwischen den Gegensätzen sind durch Kreise dargestellt. Durch Ankreuzen eines dieser Kreise können Sie Ihre Zustimmung zu einem Begriff äußern.

Beispiel:

attraktiv	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	unattraktiv				
-----------	-----------------------	----------------------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-------------

Mit dieser Beurteilung sagen Sie aus, dass Sie das Produkt eher attraktiv als unattraktiv einschätzen.

Entscheiden Sie möglichst spontan. Es ist wichtig, dass Sie nicht lange über die Begriffe nachdenken, damit Ihre unmittelbare Einschätzung zum Tragen kommt.

Bitte kreuzen Sie immer eine Antwort an, auch wenn Sie bei der Einschätzung zu einem Begriffspaar unsicher sind oder finden, dass es nicht so gut zum Produkt passt.

Es gibt keine „richtige“ oder „falsche“ Antwort. Ihre persönliche Meinung zählt!

Bitte geben Sie nun Ihre Einschätzung des Produkts ab. Kreuzen Sie bitte nur einen Kreis pro Zeile an.

	1	2	3	4	5	6	7		
unerfreulich	<input type="radio"/>	erfreulich	1						
unverständlich	<input type="radio"/>	verständlich	2						
kreativ	<input type="radio"/>	phantasielos	3						
leicht zu lernen	<input type="radio"/>	schwer zu lernen	4						
wertvoll	<input type="radio"/>	minderwertig	5						
langweilig	<input type="radio"/>	spannend	6						
uninteressant	<input type="radio"/>	interessant	7						
unberechenbar	<input type="radio"/>	voraussagbar	8						
schnell	<input type="radio"/>	langsam	9						
originell	<input type="radio"/>	konventionell	10						
behindernd	<input type="radio"/>	unterstützend	11						
gut	<input type="radio"/>	schlecht	12						
kompliziert	<input type="radio"/>	einfach	13						
abstoßend	<input type="radio"/>	anziehend	14						
herkömmlich	<input type="radio"/>	neuartig	15						
unangenehm	<input type="radio"/>	angenehm	16						
sicher	<input type="radio"/>	unsicher	17						
aktivierend	<input type="radio"/>	einschläfernd	18						
erwartungskonform	<input type="radio"/>	nicht erwartungskonform	19						
ineffizient	<input type="radio"/>	effizient	20						
übersichtlich	<input type="radio"/>	verwirrend	21						
unpragmatisch	<input type="radio"/>	pragmatisch	22						
aufgeräumt	<input type="radio"/>	überladen	23						
attraktiv	<input type="radio"/>	unattraktiv	24						
sympathisch	<input type="radio"/>	unsympathisch	25						
konservativ	<input type="radio"/>	innovativ	26						

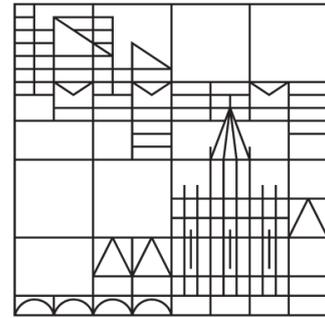
B

TECHNISCHE DOKUMENTE

Im Anhang B wurden die technische Dokumentation von FluidHaptics hinzugefügt:

- Technische Dokumentation der Hautplatine des FluidHaptics
- Datenblatt der eingesetzten Elektromagnete

Universität
Konstanz



**Technische
Dokumentation
Bedienungsanleitung**

Bewahren Sie diese technische
Dokumentation sorgfältig auf
und geben Sie diese an einen
eventuellen Nachbenutzer weiter!



E16-10027

Magnetfelderzeugung für VR-Handschuhe

FB Informatik / LS Reiterer

Inhaltsverzeichnis

1. Allgemein.....	3
2. Sicherheitshinweise und Hinweise zum bestimmungsgemäÙem Gebrauch.....	3
2.1. Allgemein.....	3
2.2. BestimmungsgemäÙe Verwendung.....	3
2.3. Demontage / Entsorgung.....	4
2.4. Gefahrenanalyse / Risikobeurteilung.....	4
3. Gerätebeschreibung.....	5
3.1. Aussehen und Anschlüsse.....	5
3.2. Funktion.....	6
4. Technische Daten.....	7
4.1. Ansteuerplatine.....	7
4.2. Magnet.....	7
5. Eingehaltene Normen.....	8
5.1. BGV A3.....	8

1. Allgemein

Der Aufbau soll dazu dienen, Elektromagnete anzusteuern, die in die Finger von Handschuhen eingearbeitet sind. Über eine mechanische Konstruktion soll dadurch steuerbarer Druck auf die Fingerkuppen ausgeübt werden. Dies soll die Illusion von taktiler Rückmeldung von Aktionen erzeugen, die dem Träger gleichzeitig über eine Virtual-Reality-Brille vorgespielt werden.

2. Sicherheitshinweise und Hinweise zum bestimmungsgemäßen Gebrauch

2.1. Allgemein

Ein unsachgemäßer Gebrauch kann zu Schäden an Personen und Sachen führen. Vor der Inbetriebnahme des Gerätes ist diese technische Dokumentation aufmerksam durchzulesen. Dadurch werden Schäden am Gerät vermieden. Diese technische Dokumentation ist sorgfältig aufzubewahren und an einen eventuellen Nachbenutzer weiter zu geben!

2.2. Bestimmungsgemäße Verwendung

- Das Gerät ist nur für den Zweck „Magnetfelderzeugung für VR-Handschuhe“ zu benutzen. Andere Verwendungszwecke, Umbauten und Veränderungen des Gerätes geschehen auf eigene Gefahr und sind möglicherweise gefährlich.
- Die Wissenschaftlichen Werkstätten Elektronik haften nicht für Schäden, die durch nicht bestimmungsgemäße Verwendung oder falsche Bedienung verursacht werden.
- Personen, die aufgrund ihrer physischen, sensorischen oder geistigen Fähigkeiten oder ihrer Unerfahrenheit oder Unkenntnis nicht in der Lage sind, das Gerät sicher zu bedienen, dürfen dieses nicht ohne Aufsicht oder Anweisung durch eine verantwortliche Person benutzen.
- Das Gerät ist für den Forschungsbetrieb im Labor in trockenen Innenräumen konzipiert.

Technische Sicherheit

- Dieses Gerät ist weder für den gewerblichen Gebrauch noch für den Gebrauch im Freien geeignet.
- Während des Gebrauchs sollte das Gerät nie unbeaufsichtigt gelassen werden.
- Das Gerät darf nur an eine Gleichspannungsquelle mit 12 V - 24 V angeschlossen werden (zum Beispiel Steckernetzgerät mit Sicherheitstransformator nach EN 61558-2-6 oder Akkumulator). Bei Nichtbeachtung können Schäden am Gerät auftreten.

- Das Gerät ist vor der Benutzung auf sichtbare Schäden zu kontrollieren. Ein beschädigtes Gerät darf nicht in Betrieb genommen werden. Ein beschädigtes Gerät kann die Sicherheit des Benutzers gefährden.
- Anschlusskabel können beschädigt werden und die Sicherheit gefährden. Das Gerät darf dann in keinem Fall benutzt werden.
- Reparaturen dürfen nur von einer Fachkraft ausgeführt werden. Durch unsachgemäße Reparaturen können erhebliche Gefahren für den Benutzer entstehen.
- Das Gerät darf niemals in Wasser getaucht werden. Feuchtigkeit am Gerät birgt die Gefahr eines elektrischen Schlages. Das Gerät darf deshalb nicht in Feuchträumen benutzt werden. Es darf keinem Tropf- oder Spritzwasser ausgesetzt werden. Es dürfen keine mit Flüssigkeit gefüllten Behälter (z. B. Blumenvasen) auf oder unmittelbar neben das Gerät gestellt werden. Das Gerät darf nicht mit feuchten Händen bedient werden.

2.3. Demontage / Entsorgung

- Die Entsorgung des Gerätes kann über den Elektroniksrott der Universität Konstanz erfolgen. Alternativ kann das Gerät nach vorheriger Absprache auch an die Wissenschaftlichen Werkstätten Elektronik zurückgegeben werden, wo es fachgerecht entsorgt wird.

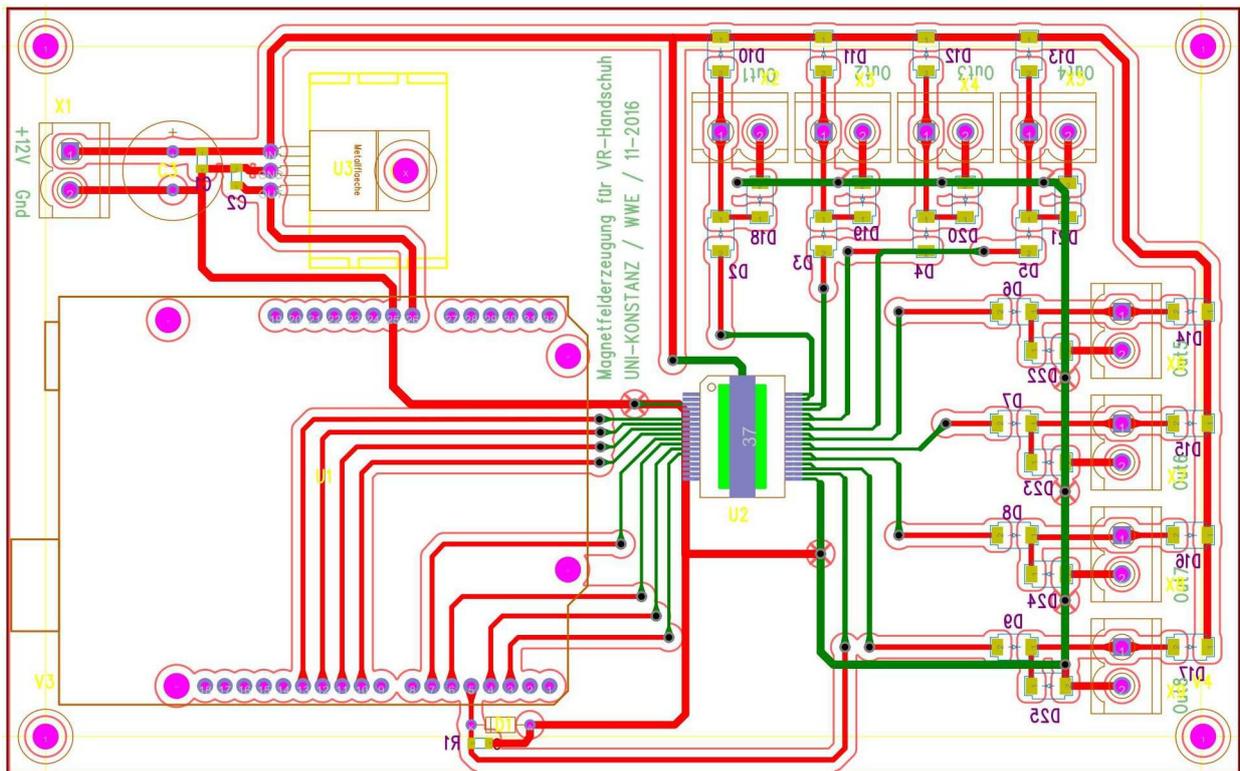
2.4. Gefahrenanalyse / Risikobeurteilung

- Bei sachgemäßem Umgang mit dem Gerät können von diesem keine Gefahren für Personen und Umgebung ausgehen.

3. Gerätebeschreibung

3.1. Aussehen und Anschlüsse

Die Ansteuerelektronik ist auf einer Europlatine mit den Maßen 100 mm auf 160 mm untergebracht. Auf dieser befinden sich ein Steckplatz für einen Arduino vom Typ Uno oder Yun, ein Spannungsregler, ein Leistungstreiber mit acht Kanälen und Buchsen für die Stromversorgung und den Anschluss der Magnete.



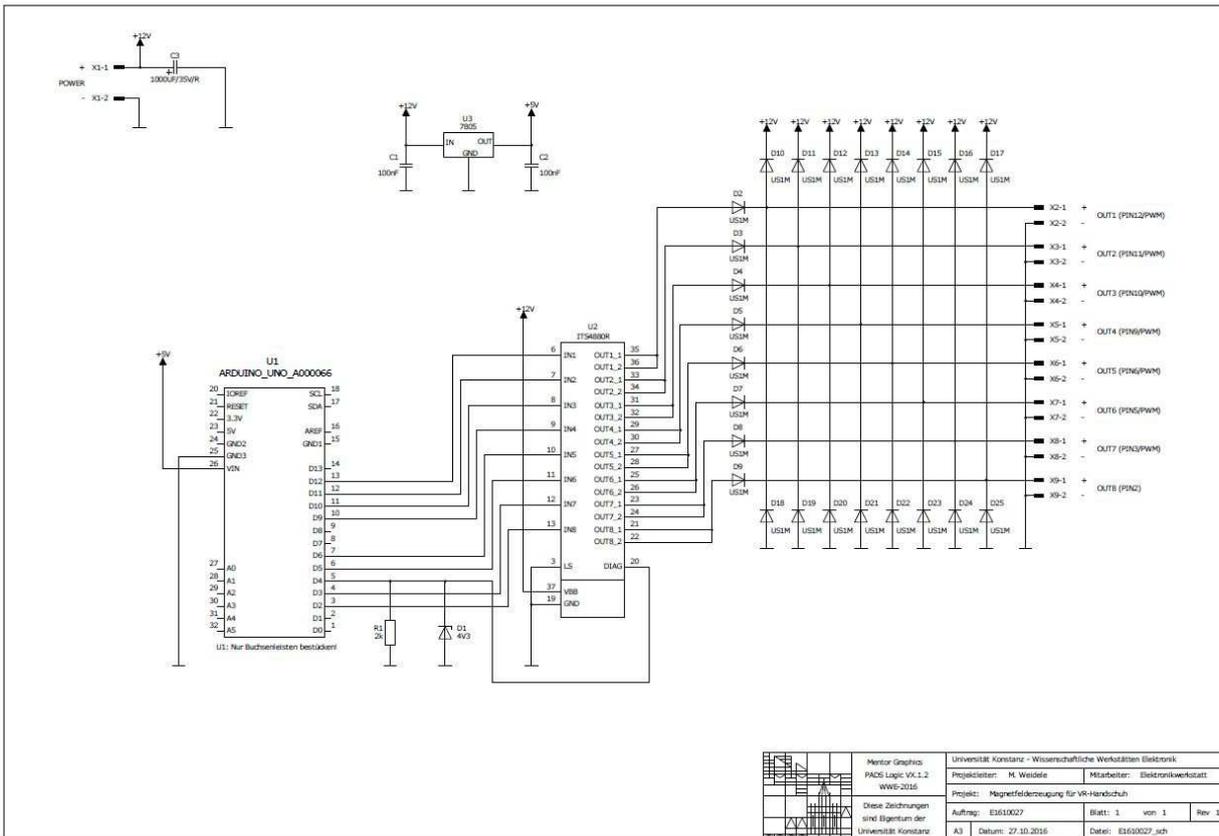
Sieben der acht Ausgangsbuchsen sind PWM-fähigen Pins des Arduino zugeordnet.

Ausgang	Arduino-Pin	PWM-fähig
OUT1	D12	ja
OUT2	D11	ja
OUT3	D10	ja
OUT4	D9	ja
OUT5	D6	ja
OUT6	D5	ja
OUT7	D3	ja
OUT8	D2	nein

Bei der Versorgungsbuchse ist darauf zu achten, dass die Elektronik nicht gegen Verpolen geschützt ist.

3.2. Funktion

Über die USB-Schnittstelle des Arduino werden diesem Datenworte zur Ansteuerung der Ausgänge übergeben. Der Leistungstreiber setzt die TTL-Pegel in den Pegel der Versorgungsspannung um, so dass die Magnete damit versorgt werden können. Der Leistungstreiber schützt sich selbst gegen Kurzschlüsse an den Ausgängen und gegen Übertemperatur. Bei letzterer schaltet er sich nicht nur aus, sondern gibt zusätzlich ein high-aktives Diagnosesignal aus. Dieses kann am Arduino-Pin D4 ausgewertet werden.



Die Versorgungsspannung kann 12 V bis 24 V betragen.

4. Technische Daten

4.1. Ansteuerplatine

Versorgungsspannung:	12 V bis 24 V DC (nicht verpolungssicher)
Strombedarf:	ca. 50 mA (Arduino) + max. 500 mA pro Magnet (bei 24 V) → ca. 3050 mA (mit 6 Magneten voll angesteuert und 24 V)
Temperaturbereich:	0°C bis 40°C (Betrieb)
Ausgangskanäle:	8 (7 davon PWM-fähig)
Absicherung:	650 mA je Kanal (elektronisch im Treiberbaustein)
Schnittstellen:	USB 2.0 (über den Arduino)
Abmessungen B x H x T:	160 mm x 100 mm
Gewicht:	ca. 0,1 kg

4.2. Magnet

Versorgungsspannung:	12 V bis 24 V DC (Polarität beliebig)
Strombedarf:	max. 500 mA bei 24 V
Temperaturbereich:	-20°C bis +55°C (Betrieb)

5. Eingehaltene Normen

Bei der Entwicklung und Konstruktion wurden die einschlägigen Sicherheitsrichtlinien und Sicherheitsnormen berücksichtigt.

5.1. BGV A3

Eine Sicherheitsprüfung nach BGV A3 ist nicht erforderlich, da das Gerät mit Kleinspannung betrieben wird. Hierfür muss bei Netzgeräten auf eine 'sichere elektrische Trennung' nach EN 61558-2-6 geachtet werden.

Electro-holding magnet

Energise to hold

25mm diameter

Part numbers

7393286

7393277

12VDC or 24VDC Operating voltage



Pull gaps

Air gap (mm)	Magnetic Pull* (N)
0.00	150
0.09	51
0.18	22
0.27	12
0.36	8
0.59	4
1.00	2

* +/- 10%

Description

Mountings **Threaded holes in rear face**

Finish **Bright nickel plated with machined face**

Product weight **66g**

Technical Data

Typical holding force **150N**

ED rating **100%**

IP Rating **54**

Standard operating voltage **12VDC (7393286)**

24VDC (7393277)

Current **12V - 180mA**

24V - 90mA

Power consumption **2.16W**

Ambient working temperature **35°C**

Connection type

12VDC and 24VDC **Free leads (500mm long)**

Recommended armature plate

Finish **Bright nickel plated**

Diameter **25mm**

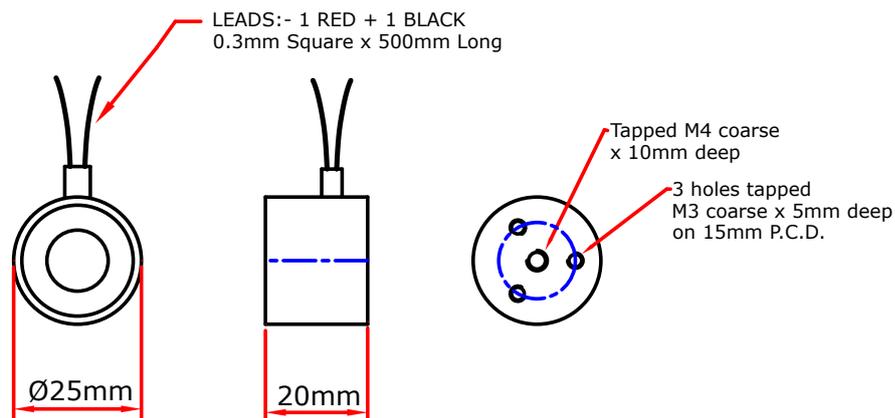
Part No. **7393264**

Weight **15g**



To achieve the optimum pull force 100% contact area must be achieved using the recommended armature plate. The force will be affected if other material specifications, thicknesses and surfaces are used, or if the armature fails to make positive contact over the full diameter of the face of the magnet. Where misalignment is likely to be an issue we recommend that an oversized armature plate is used to ensure 100% full contact, this however will reduce the stated pull force by approximately 10%.

Dimensions



ERKLÄRUNG

Ich versichere hiermit, dass ich die anliegende Masterarbeit mit dem Thema:

FluidHaptics - Taktiler Feedback für Greif-Interaktionen in Mixed-Reality Anwendungen

selbständig verfasst und keine anderen Hilfsmittel und Quellen als die angegebenen benutzt habe.

Die Stellen, die anderen Werken (einschließlich des Internets und anderer elektronischer Text- und Datensammlungen) dem Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen sind, habe ich in jedem einzelnen Fall durch Angabe der Quelle bzw. der Sekundärliteratur als Entlehnung kenntlich gemacht.

Weiterhin versichere ich hiermit, dass die o.g. Arbeit noch nicht anderweitig als Abschlussarbeit einer Bachelor- bzw. Masterprüfung eingereicht wurde. Mir ist ferner bekannt, dass ich bis zum Abschluss des Prüfungsverfahrens die Materialien verfügbar zu halten habe, welche die eigenständige Abfassung der Arbeit belegen können.

Die Arbeit wird nach Abschluss des Prüfungsverfahrens der Bibliothek der Universität Konstanz übergeben und katalogisiert. Damit ist sie durch Einsicht und Ausleihe öffentlich zugänglich. Die erfassten beschreibenden Daten wie z.B. Autor, Titel usw. stehen öffentlich zur Verfügung und können durch Dritte (z.B. Suchmaschinenanbieter oder Datenbankbetreiber) weiterverwendet werden.

Als Urheber der anliegenden Arbeit stimme ich diesem Verfahren zu.

Eine aktuelle Immatrikulationsbescheinigung habe ich beigefügt.

Konstanz, Januar 2017

Alexander Schönhals