



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
*Hamburg University of Applied Sciences*

# **Masterarbeit**

Lea Podgajnik

**Virtuelle Haptik**

Potentialanalyse Haptik-simulierender Technologien  
in der Mensch-Maschine-Interaktion

**Lea Podgajnik**

Virtuelle Haptik

–

Potenzialanalyse Haptik-simulierender Technologien in der  
Mensch-Maschine-Interaktion

Masterarbeit

im Studiengang Next Media  
am Department Informatik  
der Fakultät Technik und Informatik  
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer : Prof. Dr. Kai von Luck  
Zweitgutachter : Prof. Dr. Philipp Jenke

Abgegeben am 08.11.2016

**Lea Podgajnik**

**Thema der Arbeit**

Virtuelle Haptik – Potenzialanalyse Haptik-simulierender Technologien in der Mensch-Maschine-Interaktion

**Stichworte**

Augmented Reality, Feelscreens, Force Feedback, GUI, Haptic Design, Haptik, HCI, Interfaces, Interactive Media, Kommunikation, Mensch-Maschine-Interaktion, Mensch-Maschine-Interface, Mensch-Maschine-Schnittstelle, multimodale Sinnesansprache, NUI, Simulation, Tactile Feedback, Tastsinn, TUI, Virtuelle Haptik, Virtual Reality

**Kurzzusammenfassung**

In dieser Arbeit soll aus informationstechnologisch-konzeptioneller Sicht und mit der Berücksichtigung wahrnehmungstheoretischer Erkenntnisse die Eignung Haptik-simulierender Technologien als Mensch-Maschine-Schnittstelle untersucht werden. Ihre Sinnhaftigkeit, Notwendigkeit und Zukunftsaussicht werden beleuchtet. Im Vordergrund steht die Frage, ob sich bei digitalen Realitätssimulationen, neben der Ansprache des Seh- und Gehörsinns, die des Tastsinns durch virtuell-haptische Interaktionselemente positiv auf die menschliche Wahrnehmung auswirkt. Ob in Zukunft Haptik-simulierende Systeme zu Informations- und Kommunikationszwecken als Mensch-Maschine-Schnittstellen eingesetzt und etabliert werden sollten, wird ebenfalls beantwortet. Es erfolgt eine Eingrenzung auf Systeme mit Virtual- und Augmented Reality-Elementen und Simulatoren. Die Grundlagen der menschlichen und im Speziellen der haptischen Wahrnehmung und Informationsverarbeitung werden erläutert, ebenso die der Mensch-Maschine-Interaktion. Durch den thematischen Schwerpunkt der Arbeit wird auch ein Überblick über Virtual Reality- und Augmented Reality-Systeme gegeben. Es wird der Stand der Forschung auf dem Gebiet virtueller Haptik mit Beispielprojekten und einer Ableitung möglicher Anwendungsgebiete vorgestellt. Abschließend werden sowohl Vorteile als auch Schwierigkeiten und Risiken bei der Entwicklung, Umsetzung und Nutzung Haptik-simulierender Technologien herausgearbeitet.

**Lea Podgajnik**

**Title of the paper**

Virtual Haptics – Potential analysis of haptic simulating technologies in Human-Computer Interaction

**Keywords**

Augmented Reality, Communication Feelscreens, Force Feedback, GUI, Haptics, Haptic Design, Human-Computer Interaction, Human-Computer Interface, Interfaces, Interactive Media, multimodal sense approach, NUI, Sense of touch, Simulation, Tactile Feedback, TUI, Virtual Haptics, Virtual Reality

**Abstract**

This thesis serves the investigation of haptic-simulating technologies and their suitability for the use in human-computer interaction from a technological and cognitive scientific point of view. The meaningfulness, necessity and future prospects of this technology will be verified. Whether digital reality simulations have a better effect on human perception when, beside the senses of seeing and hearing, the tactile sense is engaged through virtual-haptic interaction elements, will be the core element of investigation to this thesis. Whether haptic-simulating systems should subsequently be implemented and established as human-machine-interfaces for better information and communication purposes in the future, will be assessed based on this primary conclusion. This work limits itself to systems with virtual and augmented reality elements and simulators. The fundamentals of human perception and haptic perception in particular, will be briefly summarized within this thesis. On the background of this foundation, human-machine interaction and selected insights on Virtual Reality and Augmented Reality systems are embedded into the larger framework of human information processing. The state of the art of virtual haptics and an overview of application examples are presented, followed by a comprehensive analysis of advantages, difficulties and risks in the development, implementation and use of haptic-simulating technologies.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>5</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>7</b>
1.1 Zentrale Fragestellung der Arbeit .....	7
1.2 Aufbau und Struktur.....	9
<b>2 Grundlagen des Tastsinns .....</b>	<b>11</b>
2.1 Definition Haptik & haptische Wahrnehmung.....	11
2.2 Physiologische & biologische Grundlagen des Tastsinns.....	12
2.3 Stellenwert des Tastsinns in der menschlichen Wahrnehmung.....	15
2.4 Der Tastsinn in der Wissenschaft.....	18
2.4.1 Historischer Überblick von der Antike zur Moderne .....	18
2.4.2 Führende Wissenschaftler in der aktuellen Haptikforschung.....	22
<b>3 Grundlagen der Mensch-Maschine-Interaktion .....</b>	<b>27</b>
3.1 Definition Mensch-Maschine-Interaktion.....	27
3.2 Basisparameter eines nutzerorientierten Mensch-Maschine-Systems.....	28
3.3 Arten von Mensch-Computer-Schnittstellen .....	30
3.4 Eignung haptischer Interfaces in der MMI.....	34
<b>4 Virtual- &amp; Augmented Reality in der MMI .....</b>	<b>35</b>
4.1 Definition Virtual- und Augmented Reality.....	35
4.2 Technische Grundlagen von Virtual- & Augmented Reality .....	36
4.3 Hardwareanwendungen für Virtual- & Augmented Reality-Systeme .....	38
4.3.1 Head Mounted Displays für Virtual Reality-Anwendungen .....	38
4.3.2 Datenbrillen zur Erzeugung von Augmented Reality .....	39
4.3.3 Cave Systeme zur Realitätssimulation .....	39
4.4 Anwendungsmöglichkeiten von Virtual- & Augmented Reality .....	41
4.5 Eignung Haptischer Interfaces für Virtual- und Augmented Reality.....	42

<b>5</b>	<b>Virtuelle Haptik .....</b>	<b>45</b>
5.1	Definition virtuelle Haptik & virtuell-haptische Interfaces .....	45
5.2	Stand der Forschung & Entwicklung Virtueller Haptik.....	47
5.2.1	Arten Haptik-simulierender Technologien.....	48
5.2.2	Technische Grundanforderungen an Haptik-simulierende Systeme .....	53
5.3	Beispielprojekte & Entwicklungen virtuell-haptischer Interfaces .....	56
5.3.1	PHANToM als Beispiel für Force Feedback Devices .....	56
5.3.2	Airborne Ultrasound Tactile Display zur Device-freien Manipulation .....	62
5.3.3	Stiftbasierte Haptography-Tools als Tactile-Feedback Devices .....	67
5.3.4	Haptik-Simulation durch Mikrochips zur neuronalen Hirnstimulation.....	73
5.4	Zusammenfassung der Anwendungsmöglichkeiten Virtueller Haptik .....	76
5.5	Abschließende Betrachtung Virtueller Haptik für Virtual Reality .....	78
<b>6</b>	<b>Konklusion .....</b>	<b>82</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>87</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>93</b>

# 1 Einleitung

Die Kommunikation eines Individuums mit der Umwelt zur Informationsgewinnung kann als ein grundlegendes und überlebenswichtiges Bedürfnis verstanden werden<sup>1</sup>. Sie erfolgt über die fünf Sinneskanäle des menschlichen Wahrnehmungsapparates, die eine visuelle, auditive, olfaktorische, gustatorische und haptische Wahrnehmung ermöglichen<sup>2</sup>. Im heutigen Kommunikationszeitalter nehmen dabei digitale Medien eine immer dominantere Rolle ein. Besonders jene Medien, die eine Informationsvermittlung durch eine virtuelle aber möglichst realitätsnahe und durch Mensch-Maschine-Schnittstellen (MMS) interaktive Abbildung der Umwelt erzeugen, nehmen an Bedeutung in der alltäglichen Kommunikation zu. Dabei erfolgt in den meisten Systemen mit Virtual- und Augmented Reality-Elementen (VR, AR) eine hauptsächlich auditiv-visuelle Interaktion mit dem Nutzer<sup>3</sup>. Durch die Ansprache mehrerer, bzw. aller Sinnesmodalitäten könnte eine ausbalancierte und effektivere Mensch-Maschine-Interaktion (MMI) ermöglicht werden. Dies gilt besonders deshalb, weil der Seh- und Gehörsinn meist bereits intensiv angesprochen oder sogar überreizt wird<sup>4</sup>. Eine zusätzliche Fokussierung auf den in der digitalen Welt bislang eher vernachlässigten Tastsinn, durch die künstliche Erzeugung haptischer Empfindungen, würde das Begreifen virtueller Objekte ermöglichen. Dies könnte eine Entlastung der anderen beiden Sinne bedeuten und einen komplementierenden, positiven Effekt bei der Wahrnehmung und Informationsgewinnung haben.

## 1.1 Zentrale Fragestellung der Arbeit

Ob Haptik-simulierende Technologien als MMS in neuen IT-Entwicklungen und Konzepten trotz der bisherigen Dominanz auditiv-visueller Benutzeroberflächen berücksichtigt und implementiert werden sollten, soll in dieser Arbeit erforscht werden. Durch eine Potenzialanalyse der technisch-praktischen Eigenschaften solcher Systeme in Hinblick auf die menschliche Wahrnehmung, soll geklärt werden, ob der Einsatz virtueller Haptik in digita-

---

<sup>1</sup> Vgl. LASSWELL, 1948

<sup>2</sup> Vgl. STEINER, 2009

<sup>3</sup> Vgl. DÖRNER et al., 2013 S.13

<sup>4</sup> Vgl. LUCKHARDT, 1999

len, realitätsrekonstruierenden Medien als sinnvoll, systemisch notwendig und zukunftsweisend verstanden werden muss. Dies soll interdisziplinär aus einer kommunikationswissenschaftlichen und informationstechnologischen Perspektive erfolgen. Dabei wird der Fokus auf Systeme gelegt, die VR- und/oder AR-Elemente zu Simulationszwecken einsetzen, da diese in der Informationsvermittlung definitorisch möglichst interaktiv und multimodal ansprechend sein sollten. Eine Eignung haptischer Simulation für dieses Gebiet wäre so ein besonders relevanter Erkenntnisgewinn. Dieser könnte u.a. in der Informatik als Wissenschaft der computerbasierenden Realitätsrekonstruktion und Informationsverarbeitung einen Forschungsfortschritt bedeuten. Durch den hohen Stellenwert der digitalen Kommunikations- und Informationstechnologie im Alltag vieler Nutzer kann der Beantwortung der zentralen Fragestellung auch eine gewisse, gesellschaftliche Relevanz zugesprochen werden. Im Konkreten soll die folgende Hypothese überprüft werden:

**H1. Die Ansprache des Tastsinns durch die Erzeugung virtueller Haptik in realitätssimulierenden Systemen ist systemisch notwendig und sinnvoll.**

Die systemische Notwendigkeit der Tastsinnesansprache soll nach der Definition realitätssimulierender Systeme feststellbar sein. Mit der Analyse von Mensch-Maschine-Schnittstellen in aktuellen und etablierten VR- und AR-Systemen kann durch die alleinige Ansprache des Seh- und Gehörsinns eine Überreizung dieser Sinne erkannt oder prognostiziert werden. Die Sinnhaftigkeit wird als gegeben betrachtet, wenn eine Wahrnehmungssteigerung und bessere Informationsaufnahme zum Nutzen des Anwenders durch die zusätzliche Ansprache des Tastsinns realistisch erwartet werden kann.

Wird die so definierte Sinnhaftigkeit und systemische Notwendigkeit virtueller Haptik und die Eignung dieser als MMS bewiesen, kann auch ihr Potenzial als zukunftsweisende und die Mensch-Maschine-Interaktion grundsätzlich verändernde Technologie bewertet werden. Wenn die Anforderungen an MMS in realitätsrekonstruierenden Systemen durch sie erfüllt und Defizite herkömmlicher audio-visueller Benutzeroberflächen aufgehoben werden können, können diese als fortschrittlich anerkannt werden. Eine Verwendung virtueller Haptik bei neuen VR- und AR-Systemen wäre in diesem Kontext erstrebenswert. Aus diesem zukunftsweisenden Potential könnte letztendlich eine grundsätzliche Veränderung der MMI erwachsen. Durch die Ansprache einer weiteren Sinnesmodalität und mit der Entwicklung

neuer virtuell-haptischer Interfaces, würden sich neue Interaktionsmöglichkeiten zwischen Menschen und virtuellen Umgebungen ergeben. Virtuelle Objekte und Welten würden in ihrer Realitätssimulation noch authentischer wirken. Eine Virtualität, die durch ein simuliertes Tasterlebnis realistischer wirkt, könnte nicht nur den Umgang mit, sondern auch das Verständnis des Menschen von der Maschine und seiner Realität verändern.

Durch die Beleuchtung der Komplexität des menschlichen Wahrnehmungsapparates hinsichtlich des Tastsinns und der Möglichkeiten, aber auch Grenzen, heutiger technologischer Systeme, können gleichzeitig Szenarien für mögliche technisch-praktische Umsetzungsprobleme in der Entwicklung virtueller Haptik durchgedacht werden. Eventuelle Kompromisse in der Konzeption, Implementierung und Nutzung von Haptik-simulierenden Technologien sollen in diesem Fall ebenfalls thematisiert werden.

## 1.2 Aufbau und Struktur

Um die zentrale Frage nach dem Potenzial virtueller Haptik als MMS zu beantworten, ist diese Arbeit folgendermaßen gegliedert:

Im zweiten Kapitel werden die Grundlagen der menschlichen Wahrnehmung und Informationsverarbeitung in Kombination mit dem Tastsinn erläutert. Dabei wird zunächst der Begriff der Haptik erklärt. Anschließend folgt eine Zusammenfassung physiologischer Merkmale und Funktionen des menschlichen Wahrnehmungsapparates. Im Folgenden wird der Stellenwert des Tastsinns und seine historische Handhabung in der Wissenschaft im Vergleich zu den anderen Sinnen des Menschen herausgestellt. Dadurch sollen die daraus resultierenden Wahrnehmungsdimensionen und Anforderungen an die Sinnesansprache festgehalten und ein grundlegendes Verständnis des Themas aus wahrnehmungstheoretischer Sicht ermöglicht werden.

Im den nächsten beiden Kapiteln wird die Mensch-Maschine-Interaktion thematisiert, wobei ebenfalls als erstes dieser Begriff definiert und danach die Grundlagen der Informationsvermittlung in MM-Systemen erklärt werden sollen. Der Fokus liegt dabei auf der Informationskommunikation- und Präsentation durch digitale Medien. Die Anforderungen an Benutzerschnittstellen und die verschiedenen Arten von Interfaces werden im Anschluss erläutert. Im vierten Kapitel werden VR- und AR-Systeme thematisiert und die aktuellen

und gängigen MMS zur interaktiven Gestaltung dieser aufgezeigt. Dadurch soll komplementär zur wahrnehmungstheoretischen auch die technisch-praktische Perspektive beleuchtet werden. Hieraus lässt sich bereits ableiten, welche Sinnesmodalitäten heutige MMS hauptsächlich bedienen und ob der Einsatz haptischer Interfaces als natürliche und „begreifbare“ Schnittstellen einen positiven Effekt auf die MMI hätten.

Im darauf folgenden fünften Kapitel – nach der Darlegung des Status quo heutiger MMS realitätssimulierender Systeme und der Herausstellung der Anforderungen an eine ideale Sinnesansprache und Informationsvermittlung – erfolgt die Eingrenzung auf virtuell-haptische Interfaces. Das Prinzip virtueller Haptik bzw. Haptik-simulierender Systeme wird in Abgrenzung zu physikalisch-haptischen Interfaces erläutert. Danach wird die grundlegende Definition virtueller Haptik diskutiert. Zusätzlich werden Kategorisierungsversuche aufgezeigt, bei denen nach verschiedenen Methoden zur Erzeugung eines simulierten Tastempfindens differenziert wird. Der Entwicklungsstand Haptik-simulierender Devices wird durch eine Auswahl geplanter und realisierter Beispielanwendungen verdeutlicht. Die Eignung virtueller Haptik als MMS wird durch die abschließende Bewertung der vorgestellten Projekte und Systeme hinsichtlich ihrer Vor- bzw. Nachteile gegenüber rein audio-visuellen MMS festgestellt.

Im letzten Kapitel werden die Ergebnisse der wissenschaftlichen Auseinandersetzung mit dem Thema reflektiert, die zentrale Fragestellung abschließend beantwortet und ein Ausblick für die Verwendung Haptik-simulierender Systeme in der MMI zur Informationskommunikation und -Präsentation gegeben. Es werden die Vorteile der zusätzlichen Ansprache des Tastsinns in VR- und AR-Systemen durch virtuell-haptische Interfaces aus wahrnehmungstheoretischer und IT-konzeptioneller Sicht zusammengefasst. Anschließend folgt die Identifikation positiver Effekte bei der Nutzung dieser Interfaces. Es werden die Risiken und Probleme in der Entwicklung und Anwendung virtueller Haptik erwogen, um eine vollständige Einschätzung der Zukunftsaussicht zu ermöglichen.

## 2 Grundlagen des Tastsinns

Um die Themen virtuelle Haptik, Haptik-simulierende Systeme und die Ansprache des Tastsinns in digitalen Realitätssimulationen durch virtuell-haptische Interfaces ausarbeiten zu können, wird in diesem Kapitel der Begriff der Haptik definiert. Eine kurze und grundlegende Erläuterung der menschlichen Wahrnehmung mit Schwerpunkt auf den Tastsinn wird vorgenommen. Dadurch soll eine Betrachtung des Themas aus wahrnehmungstheoretischer Sicht ermöglicht werden. Auf eine detaillierte und umfassende, wissenschaftliche Erklärung des menschlichen Wahrnehmungsapparates wird im Rahmen dieser Arbeit allerdings verzichtet. Der Tastsinn kann aus erkenntnistheoretischer, neurophysiologischer, psychologischer, klinischer, neuropsychologischer und anwendungsbezogener Sicht betrachtet werden<sup>5</sup>. Zur Beantwortung der zentralen Fragestellung ist dies allerdings nicht notwendig. Die Ableitung technischer Anforderungen für eine möglichst effektive Sinnesansprache ist bereits auf Basis elementarerer Erkenntnisse möglich. Durch diese Erkenntnisse kann der Stellenwert des Tastsinnes in der menschlichen Wahrnehmung eingeschätzt und die Betrachtungen des Fühlens als Sinnesmodalität in der Wissenschaft beleuchtet werden. Ein kurzer historischer Rückblick über die Tastsinnesforschung gefolgt von der Herausstellung des aktuellen Forschungsstandes, schließen dieses Kapitel ab.

### 2.1 Definition Haptik & haptische Wahrnehmung

Der Begriff „Haptik“ wurde von den griechischen Wörtern háptein (berühren, heften), háptós (fühlbar) und háptikós (zum Berühren geeignet) abgeleitet<sup>6</sup>. An und für sich wird unter ihm die wissenschaftliche Lehre vom Tastsinn verstanden. Diese fand ihren Ursprung unter anderem in der Forschung des Physiologen Ernst Heinrich Weber aus dem frühen 19 Jahrhundert. Sie untersucht die biologisch-psychologischen Grundlagen und praktische Anwendungsgebiete der Tastwahrnehmung von Menschen und Tieren. Sowohl im alltäglichen Sprachgebrauch als auch in der Wissenschaft wird der Begriff Haptik auch im Sinne von „haptische Wahrnehmung“ verwendet. Diese kann als Wahrnehmung der Umwelt bzw. der Reizstruktur eines Objekts durch aktive Exploration des Wahrnehmenden, e.g. durch Kör-

---

<sup>5</sup> Vgl. GRUNWALD, 2009 S.1

<sup>6</sup> Vgl. HARTMANN, 2014 S. 25

perbewegungen aller Art, definiert werden. Die dazugehörigen Reize werden entsprechend haptische Reize genannt, genauso wie die Informationen, die durch die Eigenbewegungen des Körpers generiert werden. Im Gegensatz dazu steht die taktile Wahrnehmung, bei der der Wahrnehmende passiv durch die Stimulation des Körpers, etwa Haut oder Gelenke, berührt wird. Die so entstehenden Reize werden taktile Reize genannt<sup>7</sup>. Diese begriffliche Unterscheidung anhand der Stellung des wahrnehmenden Subjekts zum Reiz hat sich in der Fachliteratur durchgesetzt und wird auch in dieser Arbeit zur Definition von Haptik verwendet.

## 2.2 Physiologische & biologische Grundlagen des Tastsinns

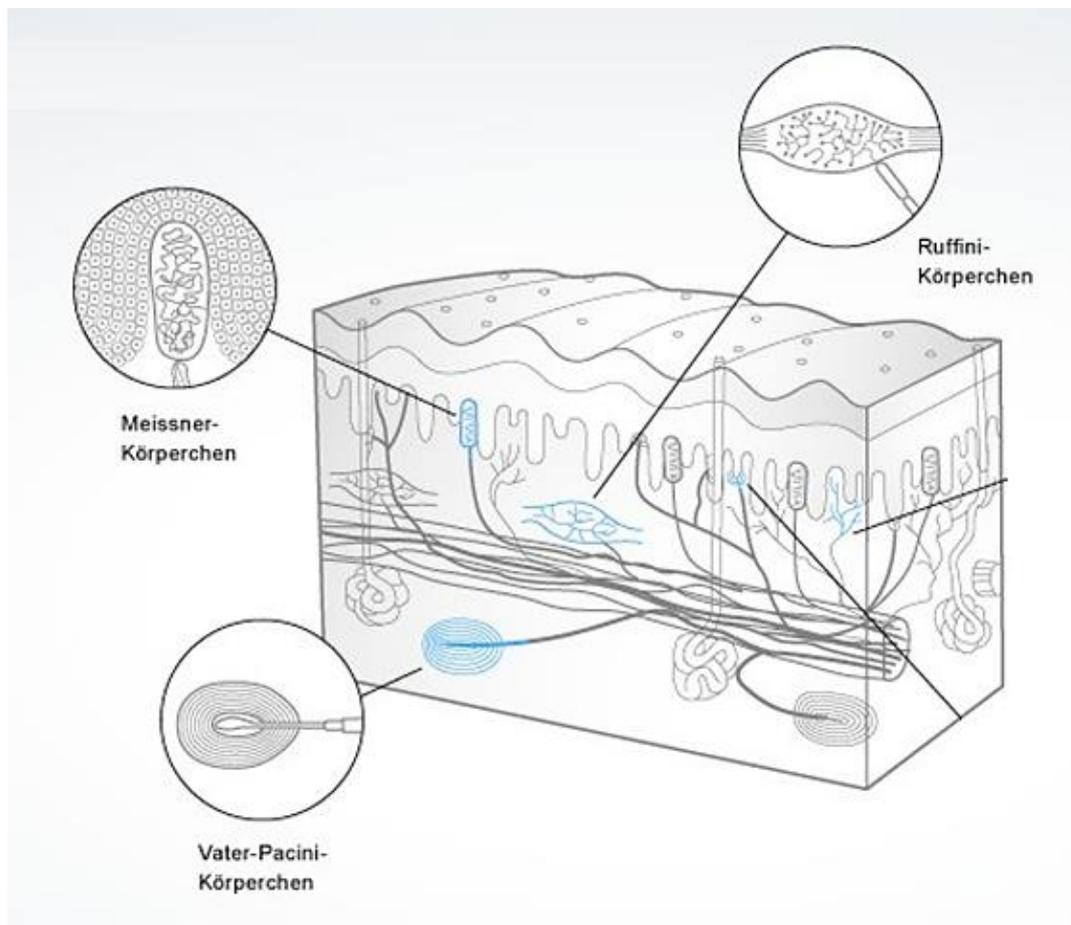
Nach der terminologischen Erläuterung von Haptik und haptischer Wahrnehmung werden nachfolgend die Grundlagen des menschlichen Tastsinns erklärt, der als Oberbegriff für beide Wahrnehmungsdimensionen verwendet werden kann. Er bezeichnet, unabhängig von der Eigenschaft der Aufnahme (aktiv oder passiv bzw. haptisch oder taktil), die Fähigkeit Umweltreize als Berührungen am Körper durch Tastsinnesorgane, beim Menschen primär der Haut, wahrzunehmen. Grundsätzlich erfolgt dies durch Sinneszellen unterschiedlicher Struktur und Art, die millionenfach und unterschiedlich tief und dicht in Haut, Muskeln, Sehnen und Gelenken des menschlichen Körpers verteilt sind. Sie dienen als Tastsensoren bzw. -Rezeptoren mit verschiedenen Funktionen und liefern über Nervenzellen durch das Rückenmark Informationen zur Analyse und Interpretation des Reizes an das zuständige Hirnareal<sup>8</sup>.

Zu den wichtigsten Tastsinnesrezeptoren zählen unter anderem die etwa 4mm langen Pacini-Körperchen, die als Vibrations-Rezeptoren dienen. Sie befinden sich in den untersten Hautschichten, Muskeln und Sehnen und sind für die Wahrnehmung von Vibration aus der Umgebung zuständig. Ein Beispiel dafür wäre etwa das Wahrnehmen eines platten Autoreifens während der Fahrt, der durch eine veränderte Vibration über das Lenkrad haptisch erfasst werden kann, bevor man ihn sieht oder hört. Eine andere Funktion übernehmen die Meissner-Körperchen als Tast-Rezeptoren. Mit 100µm Länge sind sie um einiges kleiner als die Pacini-Körperchen und liegen im Gegensatz zu diesen unmittelbar unter der Hautoberfläche. Besonders an den Fingerkuppen finden sich besonders hohe Dichten der Meissner-Körperchen. Sie sind sehr berührungssensitiv und registrieren Körperkontakte, die mit dem

---

<sup>7</sup> Vgl. GRUNWALD, 2009 S. 2

Auge nicht mehr sichtbar sind und ermöglichen das Erkennen von Oberflächenunterschieden. Zum Einsatz kommen sie etwa beim Ertasten eines Splitters in der Haut. Auch die Ruffini-Körperchen übernehmen eine zentrale Rolle im Tastsystem. Bei ihnen handelt es sich um Druck-Rezeptoren. Sie befinden sich hauptsächlich im Bindegewebe von Gelenkkapseln und nehmen die Dehnung von Gewebe sowie die Stellung des Gelenkes im Körper wahr. Sie geben dem Menschen Informationen zur Selbstwahrnehmung und der eigenen Körperlage um genaue Bewegungen, die Muskelspannung und -Kraft zu steuern<sup>9</sup>. Abbildung 1 zeigt eine schematische Darstellung zur Übersicht über die verschiedenen Sinneszellen.



**Abb. 1:** Schematische Darstellung verschiedener Tastsinnesrezeptoren in der Haut<sup>10</sup>

<sup>8</sup> Vgl. GRUNWALD, 2001 S. 11 ff

<sup>9</sup> Vgl. GRUNWALD, 2001 S. 11 ff

<sup>10</sup> ZYMALKOWSKI, 2010

Als physiologische Grundlage für die Kommunikation der verschiedenen Sinneszellen bzw. Rezeptoren mit dem Hirn zur Aufnahme und Verarbeitung von Berührungen können das somatosensorische und das sensomotorische System angeführt werden<sup>11</sup>. Ersteres dient der rein sensorischen Wahrnehmung durch die Verarbeitung von Informationen aus Haut-, Muskel- und Gelenkrezeptoren im Somatosensorischen Cortex, dem dafür zuständigen Areal der Großhirnrinde. Dort werden die mechanischen Reize sowie Schmerz- und Temperaturreize lokalisiert und bewertet.

Daraus erwächst für den Menschen die Fähigkeit der Stereognosie (Fähigkeit einen Gegenstand durch Betasten erkennen und interpretieren zu können). Auch hat das sensomotorische System einen Einfluss auf die Kinästhesie (Fähigkeit der Bewegungsempfindung und unbewussten -kontrolle und -steuerung) und die Propriozeption (Fähigkeit der Eigenempfindung durch die Wahrnehmung der Körperbewegung und -lage im Raum und der Körperteile zueinander), die durch das motorische System (System zur Kontrolle des Bewegungsapparats) gesteuert werden.

Durch die Zusammenarbeit beider Systeme zur Bewegungssteuerung in Abhängigkeit von den aufgenommenen Tastsinnesrückmeldungen, können sie zusammengefasst auch als sensomotorisches System bezeichnet werden<sup>12</sup>. Neben der Stereognosie, Kinästhesie und Propriozeption werden auch die Viszerozeption (Wahrnehmung der Information über Organtätigkeiten), die Oberflächensensibilität (Fähigkeit der Aufnahme und Interpretation von Druck, Vibration und Dehnung über die Haut), Nozizeption (Schmerzwahrnehmung) und Thermorezeption (Temperaturwahrnehmung) als weitere Wahrnehmungsaspekte des Tastsinns verstanden. Dies zeigt, dass mittels Tastsinn sowohl Informationen über die Außenwelt (Exterozeption) als auch aus dem eigenen Körper (Interozeption) erfasst werden. Außerdem soll im Hinblick auf das Thema dieser Arbeit darauf hingewiesen sein, dass die Präzision der haptischen Wahrnehmung die der taktilen Wahrnehmung hinsichtlich der Sensibilität für Berührungen und der Genauigkeit bei Oberflächendifferenzierungen deutlich übersteigt. Der Mensch ist also noch genauer und feinfühlicher beim aktiven Erkunden seiner Umwelt durch den Tastsinn<sup>13</sup>.

---

<sup>11</sup> Vgl. GRUNWALD, 2001 S. 11 ff

<sup>12</sup> Vgl. GREFKES, FINK, 2009 S. 279 ff

<sup>13</sup> Vgl. GRUNWALD, 2009 S. 2 ff

## 2.3 Stellenwert des Tastsinns in der menschlichen Wahrnehmung

Nachdem die physiologisch-biologischen Grundlagen des Tastsinns – wie Berührungen aufgenommen, Informationen darüber transportiert und verarbeitet werden und welche Fähigkeiten sich daraus ergeben – erläutert wurden, wird nun der Stellenwert des Tastsinns in der menschlichen Wahrnehmung im Vergleich zu den anderen Sinnesmodalitäten beleuchtet.

Verglichen mit der visuellen, akustischen, olfaktorischen und gustatorischen Wahrnehmung wird der haptischen weniger Beachtung geschenkt. Der Mensch wird als hauptsächlich visuelles, gegebenenfalls visuell-akustisches Wesen verstanden. In einigen wissenschaftlichen Auseinandersetzungen mit dem Thema wird sogar betont, dass 82% der Sinneseindrücke zunächst durch das Auge als Sinnesorgan, weitere 11% als akustische Reize über die Ohren aufgenommen werden, während das Riechen mit 4%, Fühlen mit 2% und Schmecken mit 1% zunächst eine untergeordnete Rolle zu spielen scheinen<sup>14</sup>. Das Fühlen wird selbst in einschlägiger Fachliteratur in diesem Kontext gelegentlich als niederer Sinn bezeichnet. Dies kann historisch auf eine streng christlich geprägte Gesellschaft im Mittelalter zurückgeführt werden, die den Tastsinn als moralisch verdächtiges und anstößiges Thema sah (eine Begründung und detailliertere Betrachtung erfolgt im Kapitel 2.4.1). Entsprechend wurde der Tastsinn sowohl im alltäglichen Bewusstsein des Menschen als auch in der Forschung (siehe Kapitel 2.4) als weniger relevant betrachtet<sup>15</sup>. Dass dies allerdings nicht gerechtfertigt ist und die haptische Wahrnehmung als keine niedere, sondern für den Menschen sehr wichtigste bezeichnet werden sollte, hat mehrere Gründe.

Zum einen wird dies bei der Betrachtung der Sinnesentwicklung des Menschen in der Embryonalperiode deutlich. Der Tastsinn eines noch ungeborenen Kindes bildet sich wesentlich früher aus als die anderen Sinnesmodalitäten. Schon in der achten Schwangerschaftswoche kann man bei einem 2,5cm großen Fötus Reaktionen auf Reize im Lippenbereich feststellen. Wenige Wochen später kann der Fötus bereits greifen, am eigenen Daumen lutschen und sich an den räumlichen Begrenzungen im Mutterleib bewegen. Auch fremde Berührungen an der Bauchdecke kann er bereits spüren. Somit entdeckt das Ungeborene, noch bevor es

---

<sup>14</sup> Vgl. FREIER, 2009

<sup>15</sup> Vgl. GRUNWALD, 2001 S. 23

auf der Welt ist, sich selbst und kann zwischen der eigenen Körperlichkeit und der Außenwelt unterscheiden. Mithilfe des Tastsinnessystems entsteht eine neuronale unbewusste Selbstwahrnehmung. Der Mensch kommt bereits mit einem festen Körperschema auf die Welt und weiß, unabhängig vom visuellen Eindruck, wie sein Körper zur Außenwelt positioniert und abgegrenzt, beschaffen und zu koordinieren ist. Die Wahrnehmung der eigenen Körperlichkeit in Abgrenzung zur Außenwelt durch den Tastsinn bildet einen Basisparameter – eine Grundlage des Selbstbewusstseins – auf dessen Basis sich alle anderen Sinne erst bilden können. Das Tastsinnessystem ermöglicht dem Menschen also als erstes den Kontakt zur Außenwelt, während sich danach Sprache, Motorik und weitere kognitive Systeme entwickeln und erlernt werden müssen<sup>16</sup>.

Auch später bleiben der Tastsinn und Berührungen entscheidend für die positive Weiterentwicklung bzw. für das Überleben des Menschen. Für das Neugeborene sind haptische Reize besonders wichtig. Ähnlich wie vor der Geburt erlebt es danach in noch stärkerer Form durch passive taktile Reize seine Körpergrenzen und durch aktives Tasten seine Umwelt. Besonders intensiv erfolgt dies indem das Neugeborene seine Welt durch Berührungen und Betasten mit Mund und Hand entdeckt. Als überlebenswichtiges Beispiel kann etwa der selbstverständliche Saug- und Suchreflex des Säuglings bezeichnet werden, durch den es zur Brustwarze der Mutter gelangt. Bis ins Kleinkindalter bevorzugt der Mensch das Anfassen um Dinge zu erkunden. Durch das Greifen von Gegenständen entwickeln Kinder komplexere Denkmuster, Lernprozesse werden beschleunigt<sup>17</sup> und das Urteilsvermögen über ihre Umwelt und andere Personen wird ausgebildet<sup>18</sup>. Auch in weiteren Wachstumsphasen sind körperliche Feedbacks der Außenwelt durch Körperkontakt zu anderen Menschen wichtig. Dieser hilft dem wachsenden Individuum, seine eigene Körperlichkeit zu erfahren. Wenn in diesen Phasen die Grundlagen zur Selbstwahrnehmung nicht oder falsch gelegt werden, können schwere Körperwahrnehmungsstörungen daraus resultieren<sup>19</sup>.

Durch die Eigenschaft des Tastsinns erstens der chronologisch erste Sinn des Menschen zu sein und zweitens grundlegend das Begreifen des eigenen Körpers und somit des eigenen Selbst in Abgrenzung zur Umgebung zu ermöglichen, wird sein besonderer Stellenwert in der menschlichen Wahrnehmung deutlich.

---

<sup>16</sup> Vgl. GRUNWALD, 2001 S. 127

<sup>17</sup> Vgl. STRERI, 2005

<sup>18</sup> Vgl. ACKERMANN et al. 2010

<sup>19</sup> Vgl. GRUNWALD, 2001 S. 128 ff

Ein weiteres Argument dafür kann aus der Betrachtung der Aufmerksamkeitsverteilung des Menschen in Abhängigkeit der Ansprache einzelner Sinnesmodalitäten gebildet werden. Abbildung 2 zeigt, wie sich bei der Wahrnehmung eines bestimmten Umweltreizes der Grad der Zuwendung verändert, je nachdem welche und wie viele Sinnesmodalitäten angesprochen werden. Bei einer rein visuellen Sinnesansprache ist die Intensität der Aufmerksamkeit noch recht gering. Sie steigt allerdings signifikant, wenn eine akustische Komponente hinzu kommt und erreicht fast das Maximum mit einem zusätzlichen haptischen Reiz. Durch die Ansprache des Geschmack- und Geruchsinn kann die Wahrnehmungsintensität nur noch geringfügig gesteigert werden.

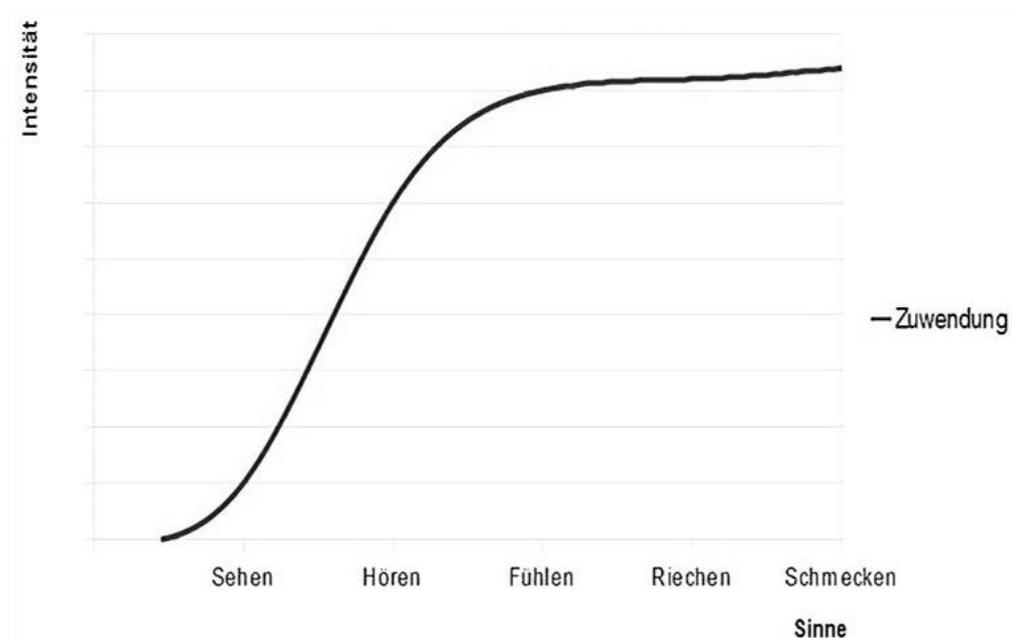


Abb. 2: Aufmerksamkeitssteigerung durch multimodale Sinnesansprache<sup>20</sup>

Eine Stimulation mehrerer bzw. aller Sinne, kann also zu einer besonders starken Wahrnehmung des Umweltreizes führen. Es zeigt sich, dass haptische Reize für eine signifikante Aufmerksamkeitssteigerung hoch relevant sind.<sup>21</sup> Auch dieser Ansatz bestätigt die Relevanz des Tastsinns für das Gesamtsystem der menschlichen Wahrnehmung.

<sup>20</sup> STEINER, 2009

<sup>21</sup> STEINER, 2009

## 2.4 Der Tastsinn in der Wissenschaft

Wie bereits im vorangegangenen Kapitel angedeutet, hat man den Tastsinn während des Mittelalters als schamhaft verstanden, sodass er, trotz seiner Relevanz für die menschliche Wahrnehmung, sowohl im alltäglichen als auch wissenschaftlichen Kontext stark vernachlässigt wurde. Ob sich dieses Missverhältnis auf das Mittelalter einschränken lässt, soll nun durch einen chronologischen Überblick zur haptischen Wahrnehmung in der Wissenschaft überprüft werden. Auch der Stand der Forschung und die bedeutsamsten Forscher auf diesem Gebiet werden in diesem Kapitel vorgestellt.

### 2.4.1 Historischer Überblick von der Antike zur Moderne

Geht man in der Betrachtung wissenschaftlicher Auseinandersetzungen über den Tastsinn zurück zur Antike, stellt man fest, dass dem Thema in dieser Epoche mehr Aufmerksamkeit geschenkt und Relevanz zugesprochen wurde. In der alten Philosophie und Psychologie wurde der Tastsinn als Schlüsselsinn und notwendige Basis für die Entwicklung anderer Sinne bezeichnet. Empedokles (482-420 v.Chr.) verstand die Sinne allgemein als Fähigkeit Objekte mit Händen zu begreifen. Diese nannte er *pagamai*, was übersetzt „Handfläche“ bedeutet. Er beschrieb verschiedene Intensitätsstärken, mit der Objekte wahrgenommen werden und nannte diese *athrein* also „auf etwas starren“. Für die allgemeine Beschreibung der Wahrnehmung berücksichtigte er also primär den Tast- und den Sehsinn. Hinter diesem Verständnis liegt Empedokles Vorstellung, dass jeder einzelne Sinn für sich das jeweilige Objekt wie mit einer Hand begreift<sup>22</sup>.

Die Eigenschaft des Tastsinns als ursprünglichster und zuverlässigster Kanal für Informationen über sich selbst und die Außenwelt wurde bereits durch Aristoteles (384-322 v. Chr.) erkannt. Die Wahrnehmung an sich beschrieb er als Seelenvermögen. Er klassifizierte Lebewesen danach über welche Seelenvermögen sie verfügen und stellte fest, dass alle mindestens den Tastsinn haben. Ebenso sah er die Entwicklung des Gefühlslebens durch den Tastsinn begründet. Andererseits wurde der Aspekt, dass Menschen und Tiere den Tastsinn als ursprünglichsten, natürlichen und fundamentalsten Sinn gemein haben, auch negativ ausgelegt – etwa dass er im Vergleich zu den anderen ein primitiver Sinn sei<sup>23</sup>. Damit begann auch die Bezeichnung als niederer Sinn, der in der Betrachtung der Wahrnehmung durch seine Selbstverständlichkeit häufig übersehen wurde. Die aristotelische Auffassung

---

<sup>22</sup> Vgl. JÜTTE, 2000 S. 42

des Tastsinns als Grundlage für alle anderen Sinne wurde von Thomas von Aquin, Dominikaner und einer der einflussreichsten Philosophen und Theologen des Mittelalters (ca. 1224-1274) unterstützt und übernommen. Er beschrieb ihn als *radix fontalis*, die Wurzel der Sinnestätigkeit<sup>24</sup>:

„Es ist offensichtlich, dass das Organ des Tastsinns im gesamten Körper ausgebreitet ist und dass jedes Sinnesorgan zugleich ein Tastorgan ist und dass das, weswegen etwas sinnlich genannt wird, der Tastsinn ist.“

Einen weiteren Grund für die Priorisierung des Tastsinns sah Thomas von Aquin durch seine eindeutige und besonders effektive Wahrnehmungsleistung. Er schlussfolgerte, dass Lebewesen, die über einen feineren Tastsinn verfügen gleichzeitig eine sensitivere Natur haben, weiter entwickelt sind und somit auch einen höheren Intellekt haben. So begriff er den Menschen als empfänglicher und wahrnehmungsempfindlicher<sup>25</sup>.

Spätestens in der Renaissance und der Barockzeit setzte sich die negative Interpretation der aristotelischen Auffassung vom Tastsinn durch: er wurde endgültig als verwerflicher Sinn betrachtet. Der Aspekt, dass der Tastsinn durch seine Ursprünglichkeit der einzige ist, über den jedes Lebewesen verfügt, verleitete dazu, ihn als primitiv und tierisch aufzufassen. Auch die Tatsache, dass der Tastsinn mit Sexualität in Verbindung gebracht wurde, führte zu seiner Abwertung. Ein Schlüsselereignis dazu stellten die Schriften von Moses Maimonides dar, eines jüdischer Philosophen und Arzt, der ebenfalls als wichtiger Gelehrter des Mittelalters gilt. Obwohl er sich für eine positive Interpretation von Aristoteles und eine Heraushebung des Tastsinns entschied, wurde diese durch seine Übersetzer nicht übernommen und, im Gegenteil dazu, mit Sündhaftigkeit, Zuchtlosigkeit und Wollust verknüpft. Seitdem beschrieben viele Gelehrten den Tastsinn direkt als schamhaft<sup>26</sup>. Die künstlerische bzw. bildliche Darstellung der fünf Sinne in dieser Zeit, unterstreicht in vielen Fällen diese Haltung gegenüber dem Tastsinn. Im Fokus der Darstellungen stand die angezweifelte Tugend des Sinnes bzw. sein sündhafter Missbrauch. Ein Beispiel dafür stellt das Werk „Gefühl“ des niederländischen Malers und Kupferstechers Hendrik Goltzius (1558-1617) dar. Der Tastsinn wurde als eine direkte erotische Berührung dargestellt. Das Gemälde zeigt ein

---

<sup>23</sup> Vgl. JÜTTE, 2000 S. 52

<sup>24</sup> Vgl. JÜTTE, 2000 S. 53

<sup>25</sup> Vgl. JÜTTE, 2000 S. 82

<sup>26</sup> Vgl. JÜTTE, 2000 S. 82-83

sich umarmendes halbnacktes Paar. Auf dem Schoß des Mannes befindet sich eine Schildkröte als Symbol der geschlechtlichen Sünde. Die Intimität der Szene wird durch die Kulisse eines mit Vorhängen gestalteten Innenraums ausgedrückt wie in Abbildung 3 zu sehen ist. Ein mahrender Text unterstreicht die Aussage<sup>27</sup>:

„Berühre nicht mit den Händen, die anzuschauen schadet, damit du nicht vom schlechteren Übel ergriffen wirst.“



Abb. 3: Personifizierte Darstellung des Tastsinnes<sup>28</sup>

---

<sup>27</sup> Vgl. BENTHIEN, 2001 S. 227

<sup>28</sup> Vgl. JÜTTE, 2000 S. 82

Andererseits war es auch die Kunst, die den bislang niederen Stellenwert des Tastsinns zur Diskussion stellte. Während der Renaissance fand ein Wettstreit zwischen den Kunstgattungen statt, der speziell auf die Kunstformen der Malerei und Plastik bzw. Skulptur abstellte. So eröffnete im 17. Jahrhundert der Wettstreit in der Kunst auch die Frage nach der Bedeutung des Tastsinnes im Vergleich zum Sehsinn. Dieser nahmen sich u.a. Sensualisten wie Berkeley, Herder und Condillac an, die allgemein Sinneseindrücke und Wahrnehmung als Ursprung allen Denkens und Handelns auffassten.

George Berkeley (1685-1753), ein irischer Theologe und Philosoph der Aufklärung, war beispielsweise der Meinung, dass das Sehen nur durch und in Kombination mit dem Tasten möglich sei. Das Auge allein könne nur Flächen und Farben erkennen, Räumlichkeit und Körperlichkeit könne nur durch Tasten wahrgenommen werden. Der deutsche Dichter und Philosoph der Weimarer Klassik, Johann Gottfried Herder (1744-1803), übernahm diese These und betonte die Überlegenheit des Tastsinns damit, dass er Körperlichkeit begreifen kann, während der Sehsinn nur Gestalten wahrnimmt. Étienne Bonnot de Condillac (1714-1780), französischer Geistlicher und Philosoph der Aufklärung, fasste zusammen, dass nur durch den Tastsinn der Mensch seine eigene Existenz –sein ich – und die Umgebung begreifen kann. Er schaffe sich ein Bewusstsein von sich und der Welt durch das aktive Erstasten und Erspüren der eigenen und fremder Körperoberflächen:

„Zuvor, als sie nur sieht, riecht, schmeckt und hört, weiß sie noch nicht, dass sie einen Körper besitzt. Erst wenn sie ihre Hände auf sich selbst legt, kann sie ihren Körper schließlich als leiblich-räumlichen entdecken. Auch von der Existenz fremder Objekte erfährt sie nur mittels der Taktilität, weil sie sich in den von ihr berührten nicht wiederfindet.“<sup>29</sup>

Trotz der Aufwertung des Tastsinns während dieser Zeit und des abnehmenden Einflusses der strengen christlichen Moralvorstellungen aus dem Mittelalter, konzentrierte sich die Aufmerksamkeit der Wissenschaft über die Neuzeit und Moderne bis heute vorwiegend auf den Seh-, Gehör- und Geruchsinn. Der Tastsinn ist, sowohl aus physiologischer als auch psychologischer Sicht, nach wie vor der am wenigsten erforschte Sinn, auch wenn viele Erkenntnisse aufgeholt wurden und ein solides Grundwissen über das Fühlen gebildet werden konnte. Diesem widmeten sich verschiedene Wissenschaftsdisziplinen. Besonders inte-

---

<sup>29</sup> Vgl. BENTHIEN, 2001 S. 233 ff

ressant war dabei die Frage, welcher Unterkategorie des Tastsinnes, der aktiven haptischen Wahrnehmung oder der passiven taktilen, sich die meisten Forscher widmeten. Vor dem Zweiten Weltkrieg wurden die haptische und die taktile Wahrnehmung im vergleichbaren Umfang erforscht. Ersterer widmete sich zum Beispiel der deutsche Psychologe David Katz, der 1925 das Temperaturempfinden von Materialien wie Holz oder Metall, unabhängig von ihrer tatsächlichen Temperatur, untersuchte oder Unterschiede im Tastempfinden durch verschiedene Körperteile in Versuchen prüfte<sup>30</sup>. Die taktile Wahrnehmung dagegen erforschte beispielsweise Maximilian von Frey, ein deutsch-österreichischer Psychologe, der 1896 bis 1929 u.a. in seinem Werk „Untersuchungen über die Sinnesfunktionen der menschlichen Haut“ den Fokus auf die Druck- und Schmerzempfindlichkeit des Menschen legte<sup>31</sup>.

Aktuell ist allerdings eine Dysbalance zum Nachteil der haptischen Wahrnehmung entstanden. Die meisten Untersuchungen widmen sich momentan der Analyse von einfachen taktilen Einzelreizen. Besonders im Hinblick auf die zuvor beschriebenen Erkenntnisse über die Wichtigkeit des aktiven Handelns des Menschen zur Selbstwahrnehmung, erscheint die Vernachlässigung der haptischen Wahrnehmung in der Forschung nicht sinnvoll. Zwar sind die Analysen aus den Untersuchungen der taktilen Wahrnehmung auch relevant für die haptische, eine Reduzierung des Tastsinnessystems auf die Verarbeitung rein taktiler passiver Reize sollte allerdings nicht erfolgen. Sowohl in der Psychologie als auch der Physiologie setzte sich die Ansicht durch, dass der Tastsinn hauptsächlich für die Verarbeitung von Berührungs- und Temperatureizen zuständig ist, während der aktive Aspekt zur Motorik gezählt wird. Im Kapitel „Grundlagen des Tastsinns“ wurde bereits der Zusammenhang zwischen Sensorik und Motorik erläutert, der begründet, dass durch die Abhängigkeit und das Zusammenspiel beider Systeme in der Tastwahrnehmung diese als Einheit betrachtet werden sollten. Somit sollten die Sensomotorik ebenso wie die aktive, haptische Tastwahrnehmung im Rahmen der Lehre des Tastsinns untersucht werden<sup>32</sup>.

#### **2.4.2 Führende Wissenschaftler in der aktuellen Haptikforschung**

Nur wenige Wissenschaftler beschäftigen sich mit der haptischen Wahrnehmung als Forschungsschwerpunkt. Aktuell gibt es weltweit nur zwei wissenschaftliche Labore, die sich einzig auf Haptik in Studien und Untersuchungen fokussieren und diese systematisch unter-

---

<sup>30</sup> Vgl. KATZ, 1925

<sup>31</sup> Vgl. FREY, 1896

<sup>32</sup> Vgl. GRUNWALD, 2009 S. 3

suchen: das Haptik-Forschungslabor an der Medizinischen Fakultät der Universität Leipzig und das Touch Lab am Massachusetts Institute of Technology (MIT) in Cambridge. Ersteres wurde 1996 als interdisziplinär arbeitende Forschungsgemeinschaft gegründet, die sich hauptsächlich der experimental-psychologischen Grundlagenforschung, der klinischen Anwendungsforschung und der industriellen Anwendungsforschung widmet<sup>33</sup>. Laborleiter ist der deutsche Psychologe und Professor Martin Grunwald. Als Haptik-Forscher ist er ein Pionier auf diesem Gebiet und nimmt sowohl hierzulande als auch international eine herausragende Stellung ein. Als einer der ersten Wissenschaftler beschäftigte er sich intensiv mit der haptischen Wahrnehmung und ist verantwortlich für die Entwicklung von Untersuchungsmethoden und Patenten auf diesem Gebiet und etablierte viele grundlegende Erkenntnisse des heutigen Forschungsfeldes. Grunwald veröffentlichte zahlreiche Arbeiten, die sowohl einen lehrbuchhaften Charakter haben als auch im Zuge ihres Erkenntnisfortschritts neue Rahmenbedingungen und Paradigmenwechsel (nach Kuhn<sup>34</sup>) der Wissenschaft etablierten. Dazu zählt die Veröffentlichung des Buches „Der bewegte Sinn – Grundlagen und Anwendungen zur haptischen Wahrnehmung“ welches Grunwald als Herausgeber und Autor in Kooperation mit weiteren Wissenschaftlern 2001 herausbrachte. Besonders nennenswert ist die Tatsache, dass Grunwald die haptische Wahrnehmung interdisziplinär beleuchtet. Neben den physiologischen Grundlagen stellt er auch die Relevanz der Haptik in Hinblick auf die Ich-Wahrnehmung des Menschen dar. Er befasst sich aus medizinischer und psychologischer Sicht intensiv mit dem Thema der Körperschemastörungen<sup>35</sup> und findet gleichzeitig Anwendungsgebiete und Möglichkeiten seine Erkenntnisse für die Industrie und Technik nutzbar zu machen. Mittlerweile ist das Interesse der Privatwirtschaft an seiner Forschung sehr groß, da der Aspekt des Fühlens als verkaufsförderndes Mittel und Qualitätsmerkmal für viele Produkte entdeckt wurde. Dies ist der Grund, weshalb sich Grunwald auch aus technisch-praktischer Sicht der Haptikforschung widmet. Das führte vermehrt dazu, dass Designer bei der Produktentwicklung sich nicht nur um die Optik eines Produkts sorgen, sondern auch „die zielgerichtete gestalterische Umsetzung von grundlegenden Wirkungsaspekten der haptischen Wahrnehmung zur Optimierung von Bedien- und Steuerungseigenschaften“<sup>36</sup> abwägen.

---

<sup>33</sup> Vgl. GRUNWALD, 2016

<sup>34</sup> Vgl. KUHN, 1976 S. 57

<sup>35</sup> Grunwalds Erkenntnisse im Zusammenhang von haptischer Wahrnehmung und Essstörungen wie Anorexia nervosa, führten zu neuen Therapieansätzen bei der Behandlung dieses Krankheitsbildes, die er in „Störung der haptischen Wahrnehmung bei Anorexia nervosa“ (2001) thematisierte.

<sup>36</sup> GRUNWALD, 2009 S.12

So kann Haptic Design als ein etabliertes Anwendungsgebiet der Tastsinnesforschung angesehen werden<sup>37</sup>, dem sich mittlerweile einige Wissenschaftler und Entwickler widmen. Beispielfähig zu nennen ist etwa Charles Spence vom Crossmodal Research Laboratory aus Oxford, der ein Warnsystem für Autofahrer durch Vibrationen im Lenkrad oder Sitz des Fahrzeuges entwickelt hat. Dies ist, im Gegensatz zu optischen Warnsignalen an Displays, direkter wahrnehmbar und entlastet gleichzeitig den bereits angestregten Sehsinn des Autofahrers<sup>38</sup>. An der Ohio State University wird an ähnlichen Entwicklungen gearbeitet, etwa an haptischen Warnsystemen für Piloten. Im Hinblick auf die haptische Informationsvermittlung durch Vibration konnte festgestellt werden, dass mehr Signale in kürzerer Zeit aufgenommen werden können, als über visuelle Anzeigen und Warntöne<sup>39</sup>. Dieser Ansatz ist auch im militärischen Bereich für die Steuerung unbemannter Maschinen interessant. Weil Haptic Design an sich thematisch irrelevant für die Beantwortung der zentralen Fragestellung dieser Arbeit ist und lediglich zur Verdeutlichung der Relevanz von Haptik im Allgemeinen herausgestellt wurde, soll an dieser Stelle auf eine weitere Ausarbeitung dieses Themenfeldes verzichtet werden.

Das Touch Lab am Massachusetts Institute of Technology wurde 1990 gegründet und versteht sich als Labor für menschliche Haptik und haptische Robotik. Es ist ebenfalls interdisziplinär ausgerichtet und beleuchtet den Forschungsbereich aus verschiedenen Perspektiven. Ziel ist es, die menschliche Haptik vollständig zu entschlüsseln um Robotik und Maschinen entwickeln zu können, die die haptische Wahrnehmung imitieren oder sie gar besitzen. Auch der Aspekt der Interaktion zwischen Mensch und Maschine durch Haptik ist für das Touch Lab relevant, besonders im Bereich von Virtual Reality – etwa durch haptische Interaktion zwischen Menschen durch das Internet in Echtzeit – und für Teleoperations-Systeme<sup>40</sup>. Geleitet und gegründet wurde das Touch Lab durch Dr. Mandayam A. Srinivasan, für den die Erforschung der menschlichen haptischen Wahrnehmung mit der Entwicklung haptischer Interfaces und haptischer Virtualität Hand in Hand geht:

„In the particular context of haptics, to develop a scientific understanding of the human haptic system, we need machines that can deliver behaviourally relevant stimuli at a level of precision that

---

<sup>37</sup> Beim Haptic Design wird während der Produktentwicklung über die Materialbeschaffenheit eines Konsumgutes entschieden – etwa wie das Textil eines Kleidungsstückes beschaffen sein muss, damit es anfühlt wie Leder, was für Materialien die Innenausstattung eines Fahrzeuges einen edlen Eindruck machen usw.

<sup>38</sup> SPENCE & HO, 2008

<sup>39</sup> JONES & STARTER, 2008

<sup>40</sup> Vgl. SCHLOERB, 2005

exceeds human haptic capabilities. To design such machines however, we need to know what the human haptic capabilities and limitations are. This “chicken and egg” problem can only be solved with co-evolution of the science of human haptics and the technology of machine haptics. Once a certain level of maturity is achieved in each, wide variety of applications [...] become possible.“<sup>41</sup>

In seinen Arbeiten konzentrierte sich Srinivasan stark auf die technisch-praktischen Möglichkeiten, die sich aus der Haptikforschung ergeben und veröffentlichte zahlreiche Publikationen zum Thema virtuelle Haptik und haptische Interfaces, besonders im medizinischen Anwendungsbereich. Eine detailliertere Auseinandersetzung mit seiner Arbeit wird in Kapitel 5 vorgestellt.

Weitere wissenschaftliche Kollektive, welche die haptische Wahrnehmung des Menschen für sich und im technischen Kontext erforschen, sind die Haptics Group als Teil des GRASP Labs der University of Pennsylvania und das Shinoda & Makino Lab der University of Tokyo. Ersteres ist ein am Department of Mechanical Engineering angesiedeltes Labor, welches sich der Entwicklung technischer Systeme im Allgemeinen widmet. Obwohl tatsächlich nur eine Einheit für die vorliegende Arbeit relevant ist, ist sie durch die Forschung um die leitende Professorin Katherine J. Kuchenbecker dennoch nennenswert. Besonders interessant sind für ihre Forschung die Themen, wie virtuelles haptisches Feedback an Authentizität gewinnen kann, wie es zu Trainingszwecken in medizinischen und chirurgischen Simulationen nutzbar gemacht und es im User Interface Design als Mensch-Maschine-Schnittstelle dienen kann<sup>42</sup>. Auf die Frage, warum sich Kuchenbecker im vielfältigen Feld der Informationstechnologie ausgerechnet auf das Gebiet der virtuellen Haptik und Haptik-Interfaces spezialisiert hat, gab sie eine Antwort, die gleichzeitig Nutzen und Vorteil der Haptik gegenüber anderen Technologien erklärt:

“I chose to become an engineer because I wanted to create technology that helps people. I was particularly excited about areas that involve human interaction with technology. Haptics is the perfect combination of these interests because it centers on hu-

---

<sup>41</sup> Vgl. SRINIVASAN, 2003

<sup>42</sup> Vgl. KUCHENBECKER, 2012

man interaction with real, remote, or virtual objects, as well as robotic interaction with physical objects.”<sup>43</sup>

Ähnlich verhält es sich bei dem Shinoda & Makino Lab in Tokyo. Es beschäftigt sich mit mehreren Themen aus der Informatik, darunter aber auch mit haptischen Interfaces und haptischen Hologrammen. Das Team um Shinoda und Makino entwickelte u.a. eine Technologie zur Erzeugung eines berührbaren Hologramms durch den Einsatz von Ultraschall-druckwellen<sup>44</sup>. Einige Projekte und technischen Entwicklungen der Haptics Group aus Pennsylvania und der japanischen Forscher werden ebenfalls im Kapitel 5 thematisiert.

Insgesamt zeigt sich, dass es bis heute weltweit nur wenige Labore gibt, die sich ausschließlich mit der haptischen Wahrnehmung beschäftigen. Allerdings fällt auf, dass sich alle Forscher in diesem Bereich dem Thema interdisziplinär annehmen und es häufig in Verbindung mit technischen Systemen bringen. Der thematische Exkurs in das Gebiet Haptic Design konnte die Vorteile der Tastsinnesansprache bereits im Produktdesign und in der Automobil- und Raumfahrtbranche andeuten. Es scheint, als hätten die Haptikforscher die Eigenschaften der Haptik als nützlich für den Einsatz im IT-Kontext erkannt - besonders bei der Interaktion mit virtuellen Objekten.

Durch die Auseinandersetzung mit dem Thema Haptik aus terminologischer und biologisch-physiologischer Sicht, der Einordnung der Relevanz des Tastsinnes im Vergleich zu anderen Sinnen und der Betrachtung des Forschungsstandes erschließt sich im Rahmen dieses Kapitels die Grundlagen des Tastsinnes. Es konnte festgestellt werden, dass es für den Menschen wichtig ist, sich selbst in der Umwelt zu verorten und diese durch das aktive Ertasten zu begreifen. Die Ansicht, der Tastsinn sei nur ein rudimentärer Überrest aus dem Tierreich, Zeichen eines kindlichen Verhaltens und Ausdruck von Sexualität ist zwar heutzutage abgelegt, hat sich aber nachhaltig negativ auf die Tastsinnesforschung ausgewirkt. Aus wahrnehmungstheoretischer Sicht muss das Einbeziehen der haptischen Wahrnehmung zur Informationsgewinnung jeglicher Art dennoch befürwortet werden. Ob dies auch für die Informationsgewinnung aus computerbasierten Virtual-Reality-Systemen gilt, kann erst nach dem folgenden Kapitel beurteilt werden. Darin sollen die Grundlagen der Mensch-Maschine-Interaktion erläutert werden, um die Betrachtung des Themas aus IT-konzeptioneller und praktisch-technischer Perspektive zu ermöglichen.

---

<sup>43</sup> Vgl. KUCHENBECKER, 2015

<sup>44</sup> Vgl. SHINODA, 2014

# 3 Grundlagen der Mensch-Maschine-Interaktion

Um die Eignung Haptik-simulierender Systeme, die das Anfassen virtueller Objekte und eine Interaktion mit ihnen ermöglichen, als Mensch-Maschine-Schnittstelle überprüfen zu können, werden in diesem Kapitel die Grundlagen der Mensch-Maschine-Interaktion erläutert. Es wird zunächst der Begriff an sich definiert, in Kontext mit thematisch verwandten Termini gesetzt und anschließend die grundlegenden Ansprüche, Methoden und Ziele einer gelungenen Interaktion des Menschen mit einem computerbasierten System vorgestellt. Es werden auch die verschiedenen Arten von Benutzerschnittstellen benannt sowie ihre Entwicklung thematisiert. So kann der Status quo von Benutzerschnittstellen in der MMI aufgezeigt werden. Danach kann aus IT-konzeptioneller und technisch-praktischer Sicht analysiert werden, ob die Ansprache des Tastsinns nicht nur allgemein zu Kommunikations- und Informationszwecken sinnvoll ist, sondern auch im computerbasierten, digitalen Umfeld von Vorteil sein kann. Wie im vorangegangenen Kapitel, kann das Thema auch in diesem Kapitel nicht abschließend sondern lediglich grundlegend behandelt werden. Die Erläuterung der Grundidee einer benutzerfreundlichen MM-Schnittstelle zur einfachen und erfolgreichen MMI und die Betrachtung der Entwicklung verschiedener Interface-Arten reichen aus um der zentralen Fragestellung dieser Arbeit Folge zu leisten.

## 3.1 Definition Mensch-Maschine-Interaktion

Als Mensch-Maschine-Interaktion (MMI) kann ein Teilgebiet der Informatik bezeichnet werden, das sich mit der Interaktion zwischen Mensch und Maschine befasst. Ins Englische wird der Begriff mit human-machine-interaction (HMI) übersetzt. Diese Interaktion erfolgt über die Mensch-Maschine-Schnittstelle (MMS) des Systems, auch Benutzerschnittstelle oder User Interface und Human Machine Interface (HMI) genannt. Diese bezeichnet die Stelle oder Handlung, mit der der Mensch mit der Maschine in Kontakt tritt. Das kann sowohl ein Lichtschalter als auch ein Lenkrad oder ein einfacher Knopf sein. Bei einem klassischen Computer kann als Schnittstelle u.a. die grafische Gestaltung durch Symbole bezeich-

net werden, die durch Steuerelemente wie Maus und Tastatur manipuliert werden können. Diese Schnittstelle wird grafische Benutzeroberfläche bzw. GUI (graphical user interface) genannt. Gleichbedeutend zur MMI wird in der Fachliteratur auch Mensch-Maschine-Kommunikation verwendet. Da es sich in vielen Fällen bei der Maschine um einen Computer handelt bzw. jeder Computer eine Maschine ist, ergeben sich Überschneidungen und Parallelen mit der Mensch-Computer-Interaktion (MCI, engl. HCI). Dieser Bereich kann als untergeordnetes Gebiet verstanden werden<sup>45</sup>. Es wird zunehmend schwieriger zwischen MMI und MCI zu unterscheiden, da viele Geräte Komponenten enthalten, die ursprünglich nur in Computersystemen verbaut waren. Daher benutzt man bei der Gestaltung interaktiver Systeme häufig den allgemeineren Begriff der MMI, ohne dabei computerbasierte Systeme auszuschließen<sup>46</sup>. Aus der terminologischen Erläuterung folgt schlussendlich, dass diese Arbeit den Einsatz virtuell-haptischer Interfaces als Mensch-Maschine-Schnittstelle in der MMI im Allgemeinen bzw. der MCI als Unterkategorie überprüft.

## 3.2 Basisparameter eines nutzerorientierten Mensch-Maschine-Systems

Um feststellen zu können, ob die Interaktion des Menschen mit einem computerbasierten System durch Ertasten und Anfassen nützlich und damit sinnvoll ist, ist es zunächst erforderlich sich über die Basisparameter eines nutzerorientierten und erfolgreichen Mensch-Maschine-Systems im Klaren zu sein. Diese Anforderung an technische Systeme entstand in den 80'er Jahren mit der Entwicklung des Personal-Computers, der im Gegensatz zu Großrechnern für den alltäglichen, persönlichen Gebrauch gedacht war und sich durch einfache Bedienbarkeit und verhältnismäßig geringe Anschaffungskosten auszeichnete. Neben der Informatik liefern auch die (Medien-) Psychologie und Kognitionswissenschaft sowie die Design- und Gestaltungsbranche Erkenntnisse zur Entwicklung eines funktionierenden Mensch-Maschine-Systems mit einer einfachen Bedienbarkeit. Diese ist gegeben, wenn ein System dem Benutzer durch angemessene Bedienhandlungen gestattet den eigenen Arbeitsablauf zu beeinflussen. Dies sollte durch eine benutzergerechte und kontextnahe MMS ermöglicht werden. Dabei sollten sowohl die Hard- als auch die Software des Systems möglichst intuitiv und selbsterklärend sein, den Nutzungskontext einbeziehen und multimediale

---

<sup>45</sup> BENDEL, 2016

<sup>46</sup> Vgl. HEINECKE, 2012 S.4

sowie multimodale Interaktionsmöglichkeiten und Dialoge - also einen Wechsel zwischen Aktionen des Benutzers und des Systems - bieten<sup>47</sup>. Eine Ansprache mehrerer Sinnesmodalitäten (e.g. visuell, auditiv und haptisch) durch Multimedia-Elemente (mehrere digitale und dynamische Medien wie Buch, Radio, PC), die multikodal (mehrere Zeichensysteme wie Text, Bild, Bewegbild, Ton) übermittelt wird, ist aus wahrnehmungstheoretischer Sicht besonders empfehlenswert<sup>48</sup>. Damit eine MM-Schnittstelle nutzbar und sinnvoll ist, muss sie den Fähigkeiten und Bedürfnissen des Nutzers entsprechen. Diese Eigenschaften sind besonders wichtig, da Systeme die nicht benutzbar sind, aus Nutzersicht nicht funktionieren und schlicht wertlos sind oder sogar gefährlich sein können.<sup>49</sup> Die Definition einer computerbasierten MMS wird deshalb als Norm zur „Ergonomie der Mensch-System-Interaktion“ in DIN EN ISO 9241-110 international festgelegt als:

„Alle Bestandteile eines interaktiven Systems (Software oder Hardware), die Informationen und Steuerelemente zur Verfügung stellen, die für den Benutzer notwendig (!) sind, um eine bestimmte Arbeitsaufgabe mit dem interaktiven System zu erledigen.“<sup>50</sup>

Des Weiteren werden folgende Grundsätze, bzw. Dialogprinzipien einer Benutzerschnittstelle genannt, die als Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit von Soft- und Hardware verstanden werden können:

- **Aufgabenangemessenheit:** ein interaktives System ist aufgabenangemessen, wenn es den Benutzer bei seiner Arbeitsaufgabe unterstützt, also wenn Funktionalität und Dialog auf den charakteristischen Eigenschaften der Arbeitsaufgabe basieren e.g. durch die Vorgabe von Standardwerten bei Eingabefeldern die dafür sinnvoll sind
- **Selbstbeschreibungsfähigkeit:** ein Dialog ist selbstbeschreibungsfähig wenn dem Benutzer zu jeder Zeit klar ist, in welchem Dialog und wo er sich dort befindet und welche Handlungen wie unternommen werden können e.g. durch die Anzeige von Zustandsänderungen des Systems -ob eine Eingabe erwartet wird oder was die nächsten Schritte sind

---

<sup>47</sup> Vgl. HEINECKE, 2012 S.3

<sup>48</sup> Vgl. LUCKHARDT, 1999

<sup>49</sup> FB MENSCH-COMPUTER-INTERAKTION, 2016

<sup>50</sup> GEIS, 2007

- Steuerbarkeit: ein Dialog ist steuerbar, wenn der Benutzer den Dialogablauf starten und seine Richtung und Geschwindigkeit beeinflussen kann, bis das Ziel erreicht ist e.g. durch die Möglichkeit, die letzte Eingabe im Eingabefeld rückgängig zu machen
- Erwartungskonformität: ein Dialog ist erwartungskonform, wenn er Benutzerbelangen aus dem Nutzungskontext und allgemeinen Konventionen entspricht e.g. durch die Verwendung von einheitlichen Funktionscodes und –tasten
- Fehlertoleranz: ein Dialog ist fehlertolerant, wenn fehlerhafte Eingaben entweder ohne oder mit minimalem Aufwand durch den Benutzer korrigiert werden können, e.g. durch automatische Fehlererkennung im Eingabefeld und Mitteilung an den Benutzer
- Individualisierbarkeit: ein Dialog ist individualisierbar, wenn Benutzer die Mensch-Maschine-Interaktion und die Darstellung von Informationen ändern können, um diese an ihre individuellen Fähigkeiten, Bedürfnisse und Vorlieben anzupassen, e.g. durch abschaltbare und erweiterbare Menüs
- Lernförderlichkeit: ein Dialog ist lernförderlich, wenn der Benutzer beim Erlernen der Nutzung des interaktiven Systems unterstützt und angeleitet wird, e.g. durch durchgängige Konzepte bei der Strukturierung von Dialogen<sup>51</sup>

Diese Dialogprinzipien zeichnen nach der DIN-Norm eine gelungene Benutzerschnittstelle aus und sollten bei der Entwicklung möglichst komplett oder zahlreich als Eigenschaften der Schnittstelle vertreten sein.

### 3.3 Arten von Mensch-Computer-Schnittstellen

Es kann zwischen verschiedenen Arten von computergestützten Benutzerschnittstellen unterschieden werden, die vielfältige Interaktionslevel bieten. Das Interagieren mit dem Computer über Kommandozeilen (Command Line Interface, CLI) kann als die ursprünglichste Mensch-Computer-Schnittstelle betrachtet werden, in der der User über die Tastatur direkt im Terminal zeilenorientiert entsprechende Befehle eingeben kann. Dies erfolgt häufig, aber nicht zwingend in Textform.<sup>52</sup>

Angrenzend daran kann die Zeichenorientierte Benutzerschnittstelle (Text User Interface, TUI) genannt werden, die textbasiert ist aber keine unmittelbare Eingabe vom Benutzer

---

<sup>51</sup> SCHNEIDER, 2010

voraussetzt, sondern in Form von Menüs und Eingabefeldern über die Tastatur bedient werden kann<sup>53</sup>.

Als eine Entwicklung daraus kann die bereits genannte Grafische Benutzeroberfläche (GUI) verstanden werden, die aktuell zu den am häufigsten benutzten Mensch-Computer-Schnittstellen zählt. Dabei werden komplexe Oberflächen gestaltet, in denen durch Symbole auf dem Display Interaktionselemente durch die Maus oder Tastatur anwählbar gemacht werden. Mit diesen Steuerelementen arbeiten viele Menschen praktisch selbstverständlich, allerdings muss der Umgang erlernt werden und ist nicht intuitiv. Zwar ist der Gebrauch dieser Technologie heutzutage standardisiert, ein grundlegendes Verständnis des Systems sowie die motorischen Fähigkeiten (etwa zum Koordinieren der Maus) muss der Nutzer sich erst aneignen. Die grafische Gestaltung eines Desktop-GUI ist beispielsweise an eine Büro-kulisse angelehnt, in der Objekte wie Schreibtisch, Ordner, Papierkorb usw. verwendet werden<sup>54</sup>.

Ebenfalls alltäglicher geworden ist der Gebrauch von sprachbasierten Benutzerschnittstellen (Voice User Interfaces, VUI), bei denen der Nutzer durch Spracheingabe, Spracherkennung und automatisierte Sprachausgabe des Systems mit dem Computer kommunizieren kann.<sup>55</sup>

Als eine recht neue aber bereits fest etablierte Interaktionsmöglichkeit können natürliche Benutzerschnittstellen (Natural User Interface, NUI oder Reality Based Interface) angeführt werden, die mit der Entwicklung des Touchscreens einhergingen, allerdings auch in gesten-gesteuerten Gaming-Systemen, die durch Sensoren die Bewegungen des Nutzers tracken, (Microsoft Kinect, Nintendo Wii) zum Einsatz kommen. Als eine natürliche Benutzungsart wurde das Anfassen, Schieben und Tippen von Elementen mit der Hand bzw. die Steuerung eines Systems mit dem eigenen Körper (im Gegensatz zum Erlernen des Umgangs mit der Maus usw.) verstanden. Der Touchscreen (bzw. die entsprechende Anwendung) reagiert also auf Finger- und Handbewegungen und kann so eine gestenbasierte, an natürliche Bewegungen angelehnte, intuitive Bedienung mit Tipp- und Wischbewegungen ermöglichen. Künstliche Eingabesysteme wie Maus und Tastatur werden damit überflüssig, das interaktive Gerät wird direkt bedienbar. Die eigentliche Schnittstelle (Touchscreen, Sensor- & Kamera-Hardware oder Sensor-Controller bei der Gaming-Anwendung) sollte dabei kaum mehr für den Nutzer sichtbar sein, die Bewegungen und Berührungen des Nutzers sollten im Vor-

---

<sup>52</sup> Vgl. HEINECKE, 2012 S.4ff

<sup>53</sup> Vgl. HEINECKE, 2012 S.4ff

<sup>54</sup> Vgl. HEINECKE, 2012 S.4ff

<sup>55</sup> Vgl. HEINECKE, 2012 S.4ff

dergrund stehen und durch Systeme zur Gesten-, Mimik- und Objekterkennung aufgenommen und interpretiert werden. So kommt auch zum ersten Mal ein taktiler Feedback zum Einsatz, indem etwa das Gerät beim Drücken einer auf dem Bildschirm dargestellten Taste eine Vibration auslöst, die an das Bedienen einer physikalischen Taste erinnern soll. Der Touchscreen gibt dem Nutzer so eine haptische Rückmeldung über seine Eingabe. Durch die natürliche Steuerung virtueller Objekte wie es der Nutzer auch in der realen Umwelt gewohnt ist, können Handlungen aus dem Alltag in das digitale System intuitiv übertragen werden. Durch diesen realitätsnahen Ansatz für die Gestaltung von User Interfaces soll der künstliche Umgang mit technischen Systemen einem natürlichen Austausch weichen, um eine Klasse möglichst barrierefreier MMI zu erschaffen<sup>56</sup>.

Eine weitere Entwicklung, die es allerdings noch nicht in den Alltag der meisten Nutzer geschafft hat, stellen gegenständliche, greifbare Benutzerschnittstellen (Tangible User Interface, TUI) dar. Die Interaktion des Menschen mit dem Computer wird hierbei durch physische Objekte wie Würfel oder Bälle ermöglicht. Ziel ist es die Interaktion im dreidimensionalen Raum haptisch erfahrbar zu machen. Als Eingabegeräte dienen verschiedene materielle Gegenstände die arrangierbar und bewegbar sind und der Steuerung und Repräsentation von Information dienen. Der Benutzer kann die Objekte direkt anfassen und manipulieren und damit den Zustand des Systems beeinflussen. Derartige Schnittstellen können entsprechend als haptische Interfaces verstanden werden<sup>57</sup>.

Im Gegensatz zu den zuvor vorgestellten Schnittstellenarten kann diese Klasse recht abstrakt wirken, sodass an dieser Stelle ein Beispiel für eine solche *begreifbare* Benutzerschnittstelle angeführt werden soll: das *reactTable* entwickelt von der Music Technology Group der Pompeu Fabra Universität in Barcelona. Dabei handelt es sich um ein computerbasiertes Musikinstrument in Tischform, das über die Tischplatte mit verschiedenen darauf befindlichen Objekten als Benutzerschnittstelle angesteuert wird. Das *reactTable* kann von mehreren Benutzern parallel bedient werden. Dabei werden mit veränderter Position und Lage der auf dem Tisch befindlichen Objekte auch die Parameter eines akustischen Synthesizers verändert, sodass das Instrument verschiedene Klänge und Töne von sich gibt und ein Musikstück erzeugt werden kann. Abbildung 4 zeigt einen Prototyp des *reactTable* und die Interaktion der Nutzer mit dem System.<sup>58</sup> Es gibt mittlerweile verschiedene Projekte und Systeme die TCIs verwenden. Aktuell wird in der Entwicklung neuer Computersysteme viel mit dieser Schnittstellenart experimentiert. Als besondere Vorteile dieses Interface-Typen

---

<sup>56</sup> Vgl. HEINECKE, 2012 S.4ff

<sup>57</sup> Vgl. HEINECKE, 2012 S.4ff

können die vielfältigen spielerischen Einsatzmöglichkeiten genannt werden, sowie die Tatsache, dass der Tastsinn als vom Menschen gern genutzte Modalität zum Entdecken neuer Gegenstände angesprochen wird. Zusätzlich können in vielen Systemen mit TUIs mehrere Nutzer gleichzeitig mit dem System interagieren, sodass ein kooperativeres System entsteht als durch den Einsatz klassischer GUIs. Diese Aspekte machen TUIs besonders interessant für die Verwendung in Ausstellungs- und Museumsszenarien, wenn diese den nicht an die Benutzung eines PCs erinnern sollen, sondern eine spielerische Interaktion und Entdeckung des Systems ermöglichen sollen.



Abb. 4: reacTable als Beispiel für ein Gegenständliches HCI<sup>59</sup>

Obwohl die vorgestellten Interfacearten sehr unterschiedlich sind, gelten für alle dieselben Anforderungen und Standards für eine nutzergerechte Gestaltung und Funktionsweise. Die Weiterentwicklung der Interfaces von codebasierten Terminalbefehlen, über grafische Darstellungen, bis hin zur natürlichen Gestenbenutzung und den Einsatz physikalischer Objekte als haptische Interfaces zeigt, dass ein immer intuitiver und natürlicher Umgang mit Computersystemen angestrebt wird. Der Nutzer soll mit möglichst wenig Lernaufwand und Pro-

<sup>58</sup> KOLLE, 2016

<sup>59</sup> MUSIC TECHNOLOGY GROUP, 2003

grammierkenntnissen mit ihnen in Interaktion treten können. Trotz des Potentials natürlicher Interfaces ist die andauernde Dominanz visueller Interfaces in den meisten Systemen unbestritten.

### 3.4 Eignung haptischer Interfaces in der MMI

Die Betrachtung der grundlegenden Funktion einer Mensch-Maschine-Schnittstelle, der geforderten Dialogprinzipien und einiger verschiedener Interface-Arten für eine gelungene MMI hat gezeigt, dass die Kommunikation und Interaktion zwischen Mensch und Maschine nicht trivial ist. Die Anforderungen, die an eine Benutzerschnittstelle gestellt werden, sind durchaus komplex und die Entwicklung eines solchen Interfaces muss sowohl die Nutzerbedürfnisse als auch den Nutzungskontext berücksichtigen. Grundsätzlich zeigt sich allerdings, dass besonders die Ansprüche einer multimodalen Sinnesansprache und intuitiver Bedienbarkeit von Interfaces für die Einbeziehung weiterer Sinneskanäle und einen Einsatz natürlicher Interfaces sprechen. Das Einbeziehen des Tastsinns in der MMI als komplementäres Element im Sinne der Multimodalität – wenn es sich als natürliches Interface anbietet – kann also nicht nur für die Kommunikation und Informationsvermittlung im Allgemeinen, sondern der MMI im Speziellen als sinnvoll betrachtet werden.

Die Entwicklung der Interfacearten von Terminalbefehlen, über grafische Darstellungen bis hin zur natürlichen Gestensteuerung oder dem Einsatz physikalischer Objekte als haptische Interfaces verdeutlicht den Wunsch, mit der digitalen Welt nicht mehr über den bisher klassischen Weg am PC und andere Endgeräte zu interagieren, sondern realitätsnähere Anwendungen zu finden. Beispielsweise wäre statt einer Informationsvermittlung durch eine auf einem Computer aufgerufene Webseite, eine Vermittlung durch das aktive Betreten einer mehrdimensionalen und interaktiven computergeschaffenen Umwelt denkbar<sup>60</sup>. So beschreibt sich der Ansatz von Virtual- und Augmented Reality. Die bisher vorwiegend visuelle Ansprache der Nutzer in der MMI scheint dafür nicht auszureichen, besonders wenn die Realitätssimulation authentisch sein soll. Eine Kombination, etwa aus visuellen, auditiven und haptischen Interaktionsmöglichkeiten könnte sich für eine vollkommeneren MMI als geeignet erweisen, um möglichst vielen Dialogprinzipien Rechnung zu tragen und so einen höheren Grad an Authentizität zu erreichen. Diese Theorie kann nach einer detaillierteren Erklärung von VR- und AR-Systemen im folgenden Kapitel verifiziert werden.

---

<sup>60</sup> Vgl. DÖRNER et al. 2013 S.21

# 4 Virtual- & Augmented Reality in der MMI

Um zu prüfen ob zunächst physikalisch-haptische Interfaces und in der Folge auch Haptik-simulierende Technologien ein erwünschtes Anwendungspotenzial bergen, soll im Folgenden der Begriff Virtual Reality und Augmented Reality definiert und das technische Prinzip realitätssimulierender Systeme grundlegend erklärt werden. Auch werden verschiedene Methoden und Technologien zur digitalen Realitätssimulation sowie mögliche Anwendungsmöglichkeiten solcher Systeme aufgezeigt. Daraufhin kann eine erste Einschätzung über die Eignung physikalisch-haptischer Interfaces als MMS in VR-Systemen erfolgen.

## 4.1 Definition Virtual- und Augmented Reality

Grundsätzlich kann Virtual Reality (VR) als das Produkt einer Technik zur Simulation/Konstruktion der Wirklichkeit mit all ihren physikalischen Eigenschaften in einer computergenerierten, interaktiven Umgebung in Echtzeit verstanden werden. Die dargestellte Realität sollte rein computergeneriert sein, während bei Augmented Reality (AR, auch Mixed Reality und erweiterte Realität genannt) eine Vermischung zwischen virtuellen und realen Elementen erwünscht ist, sodass eine Anreicherung der Realität durch virtuelle, computergestützte Informationen wie Einblendungen und Überlagerungen erfolgt. Beide Systeme kann man als Unterkategorien von VR-Applikationen im Allgemeinen ansehen, die sich in ihrem Grad der Immersion, also des Einbeziehens bzw. Eintauchens des Nutzers in die digitale Umgebungsstruktur, unterscheiden (VR: stark immersiv, AR: nicht immersiv). 1996 formulierten John Wann und Mark Mon-Williams folgende Definition für virtuelle Umgebungen<sup>61</sup>:

„Eine virtuelle Umgebung ermöglicht dem Benutzer Zugriff zu Informationen, die anderenfalls am gegebenen Ort oder zur gegebenen Zeit nicht verfügbar wären, sie stützt sich auf natürliche

Aspekte der menschlichen Wahrnehmung, indem sie visuelle Information in drei räumlichen Dimensionen einsetzt, und sie kann diese Information mit weiteren sensorischen Reizen oder zeitlichen Veränderungen anreichern.“

## 4.2 Technische Grundlagen von Virtual- & Augmented Reality

VR-Systeme sollten sich im Idealfall einer multimodalen Sinnesansprache bedienen und so als besonders wahrnehmungsintensive und erlebnisorientierte IT- Informationssysteme genutzt werden. Für den Nutzer soll das Eintauchen in eine neue Welt möglich werden - das Erleben soll immersiv sein. Die virtuelle Welt sollte im besten Fall durch alle Sinne als authentisch wahrgenommen werden und durch natürliche Handlungen steuerbar sein. Christopher Wickens und Polly Baker fassen 1995 die Anforderungen an virtuelle Welten durch 5 Elemente zusammen:

1. Dreidimensionalität: dreidimensionale, 360° umfassende Ansicht der Darstellung
2. Dynamik: dynamische, in Echtzeit erfolgende Darstellung
3. Interaktive, intuitive, benutzerzentrierte Interaktion
4. Benutzerbezogenes Bezugssystem
5. Multimodale Interaktion<sup>62</sup>

Die in AR ergänzenden, computergenerierten Informationen können dagegen als Markierungen und Hervorhebungen erkannt werden, sodass eine nicht-immersive, erweiterte Realität entsteht<sup>63</sup>. Für beide System-Typen wird ein Computersystem benötigt, welches

1. die Aktionen der User möglichst nach dem Hands-Free-Computing-Prinzip (also ohne die Benutzung künstlicher Steuerelemente wie Tastatur und Maus, sondern beispielsweise durch natürliche und zum Kontext passende, authentische Interfaces) erkennen,

---

<sup>61</sup> Vgl. WANN & MON-WILLIAMS, 1996

<sup>62</sup> WICKENS & BAKER, 1995

<sup>63</sup> Vgl. DÖRNER et al. 2013 S.21

2. interpretieren (e.g. durch Gesten-, Bewegungs-, Blicktracking mit Sensoren, Kameras, Mikrofonen zur Sprachsteuerung),
3. die Informationsvermittlung als Simulation und Erweiterung der Realität beginnen (e.g. durch dynamische und digitale 3D Projektionen, auch haptische Holografie und Audiowiedergabe)
4. und durch eine entsprechende Sinnesansprache (e.g. durch Lautsprecher, Displays, Raumprojektoren, Force Feedback) dem User in Echtzeit vermitteln kann.

Für AR-Anwendungen ist sowohl die Hardware zur Erfassung der realen Welt (meist Videokameras) als auch zur Anzeige visueller Informationen nötig, ansonsten sind die Komponenten zur Ermittlung der Position des Benutzers und die entsprechende Systemsoftware vergleichbar. Abbildung 5 bietet einen Überblick über die Elemente eines VR/AR-Systems. Der Anteil computergenerierter Informationen ist durch den ergänzenden Charakter der AR deutlich kleiner, sodass auch eine geringere Rechenleistung ausreichend ist. Obwohl auch bei der AR-Anwendung die Anreicherung durch hauptsächlich visuelle Informationen erfolgt, ist die Ansprache anderer Modalitäten theoretisch möglich, solange dadurch keine Hindernisse für die Interaktion mit der realen Welt entstehen<sup>64</sup>.

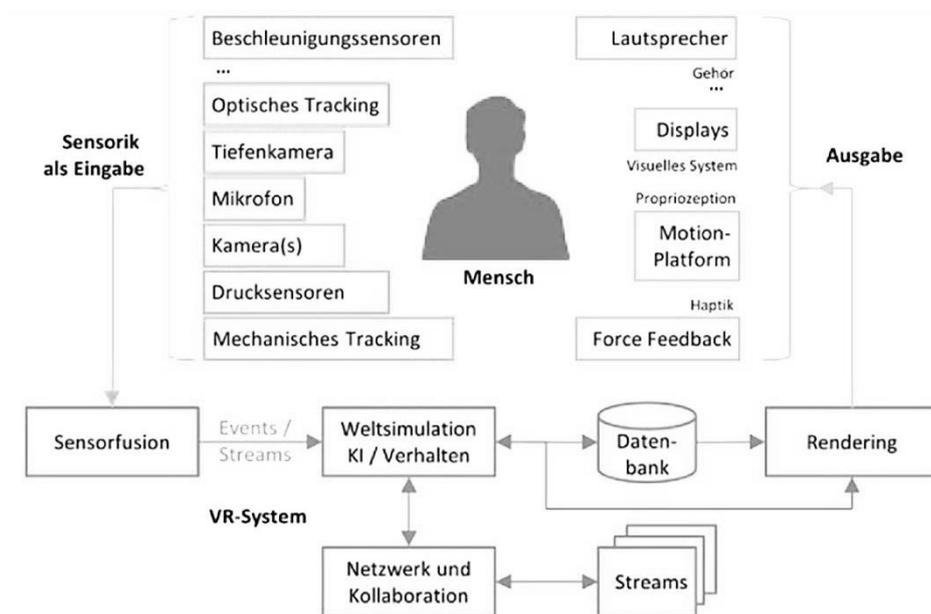


Abb. 5: Elemente eines VR/AR-Systems<sup>65</sup>

<sup>64</sup> BARFIELD et al. 1995

<sup>65</sup> DÖRNER et al. 2013, S.21

## 4.3 Hardwareanwendungen für Virtual- & Augmented Reality-Systeme

Es kann zwischen mehreren VR- und AR-Hardwaretypen unterschieden werden, wie beispielsweise Head-Mounted-Displays (HMD), Datenbrillen oder Cave Systemen. Fest steht, dass zur Erzeugung von VR und AR mehr Rechenleistung und aufwendigere technische Komponenten nötig sind, sodass diese Systeme erst in den letzten Jahren mit zunehmend fortschrittlicher Technologie für den Massenmarkt zugänglich werden. Sowohl die HMD-, Datenbrillen- als auch die CAVE-Technologie basiert auf einer hauptsächlich audio-visuellen Ansprache und Simulation bzw. Anreicherung der Realität<sup>66</sup>.

### 4.3.1 Head Mounted Displays für Virtual Reality-Anwendungen

HMDs dienen der Erzeugung einer virtuellen Realität durch das Übertragen von (3D-/bewegten) Bildern über ein Head-Mounted-Display. Dies ist ein auf dem Kopf des Nutzers getragenes Wiedergabegerät welches häufig eine brillen- oder helmähnliche Form hat und das ganze Sichtfeld des Nutzers bespielen soll. Der Nutzer wird so von anderen visuellen Umwelteindrücken isoliert und kann seine Aufmerksamkeit allein auf die projizierten Inhalte lenken. Zusätzlich kann ein Tracking der Nutzerbewegungen und Gesten erfolgen, damit die Wiedergabe des HMD an die Aktionen des Nutzers angepasst werden kann. Die Grafik und Akustik eines Computerspiels kann so grundsätzlich über HMD-Geräte abgespielt werden. Durch die Isolation von anderen Reizen und die Anpassung bzw. Steuerung durch die Gesten und Bewegungen des Nutzers ergibt sich allerdings ein viel immersiveres Erlebnis des Dargestellten.<sup>67</sup> Als ein bekanntes Beispiel kann die von Palmer Luckey an der University of Southern California entwickelte Oculus Rift angesehen werden, die hauptsächlich als Hardware für Gaming-Zwecke konzipiert wurde<sup>68</sup>. Ein ähnliches, sehr aktuelles Beispiel ist das VR-Headset von Google, genannt Daydream, bei dem ein kompatibles Smartphone in die Halterung der Brille geschoben wird um ein VR-Bild zu erzeugen<sup>69</sup>.

---

<sup>66</sup> Vgl. DÖRNER et al. 2013

<sup>67</sup> Vgl. HEINECKE, 2012, S.9ff

<sup>68</sup> OCULUS VR, 2016

<sup>69</sup> GOOGLE, 2016

### 4.3.2 Datenbrillen zur Erzeugung von Augmented Reality

Für AR eignen sich besonders Datenbrillen, die durch verbaute Miniaturcomputer digitale Informationen anzeigen, aber gleichzeitig wie herkömmliche Brillen durchlässig sind, sodass man bei der Nutzung stets die reale Umgebung sieht. Ein Anwendungsbeispiel wäre, angelehnt an Museumsbesichtigungen mit tragbaren Kopfhörern für begleitende Audio-Informationen, eine Stadtführung mit eingeblendeten Informationen zu den Sehenswürdigkeiten, die man in dem jeweiligen Moment betrachtet. Als Beispiel für diese Technologie kann an dieser Stelle die Google Glass genannt werden<sup>70</sup>. Allerdings können AR-Anwendungen auch ohne den Einsatz von speziellen Devices genutzt werden. Ein ebenfalls sehr aktuelles und populäres Beispiel stellt die AR-Funktion der Gaming-App Pokèmon Go dar, die lediglich durch ein übliches Smartphone genutzt und bedient werden kann. Der Nutzer bewegt sich in der realen Umgebung als Spielfeld; betrachtet er diese durch seine Handykamera, werden virtuelle grafische Elemente eingeblendet, mit denen er im Spiel interagieren kann<sup>71</sup>.

### 4.3.3 Cave Systeme zur Realitätssimulation

Auf einem anderen Prinzip basiert die Simulation einer VR mit einem Cave-System (Cave Automatic Virtual Environment). Dabei handelt es sich um eine real begehbare Rauminstallation in der eine dreidimensionale, automatisierte, virtuelle Umwelt generiert wird, die in Echtzeit und interaktiv auf den Nutzer reagiert. Häufig dienen sowohl die Wände als auch Decke und Boden des Raumes als Projektionsfläche für die Wiedergabe dreidimensionaler Bilder. Zur akustischen Ansprache werden Lautsprecher verwendet. Als Beispiel kann das 1992 entwickelte CAVE System aus dem Electronic Visualization Laboratory der University of Illinois at Chicago genannt werden<sup>72</sup>. In den meisten Cave-Systemen werden, ähnlich wie in der VR im Allgemeinen, sehr aufwendige und überzeugende visuelle Realitätsdarstellungen gezeigt und um passende akustische Reize ergänzt. Die Ansprache des Tastsinns findet selten statt, obwohl die Relevanz von Multimodalität und natürlicher Interaktivität bekannt ist und verhältnismäßig problemlos erzeugt werden könnte.

Julia Fröhlich und Ipke Wachsmuth von der Technischen Fakultät der Universität Bielefeld unternahmen einen Versuch Cave-Systeme um ein physikalisch-haptisches Element durch

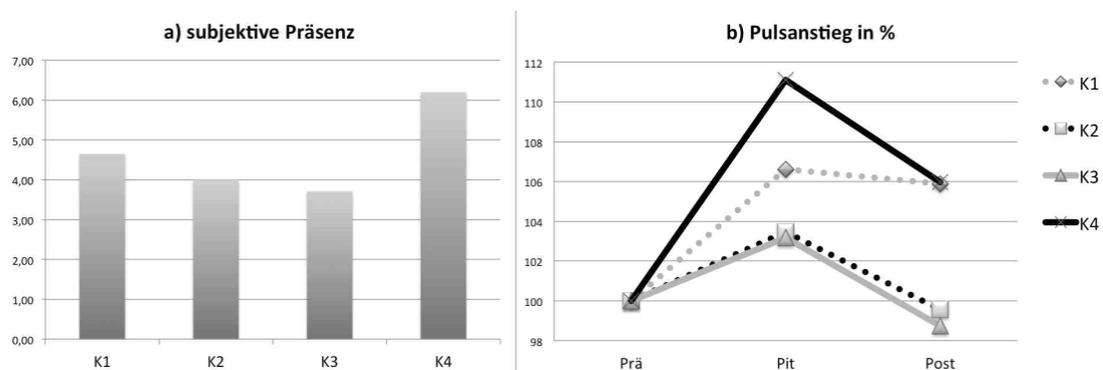
---

<sup>70</sup> GOOGLE, 2015

<sup>71</sup> GESSAT, 2016

<sup>72</sup> CRUZ-NEIRA et al. 1992

das Erzeugen von Wind zu ergänzen. Sie stellten durch eine Benutzerstudie mit 80 Teilnehmern fest, dass die Kombination von visuellen, akustischen und haptischen Reizen zu einer nennenswerten Steigerung des Präsenzepfindens führt. Haptische Windsysteme werden selten in VR verwendet, obwohl sie vielfältig eingesetzt werden können, etwa für das Empfinden von Geschwindigkeit, der Darstellung von Umgebungswind, für Temperaturreize oder Windeffekte durch Objekte, wie etwa vorbeifahrende Autos. In dem Projekt wurde ein solches Windsystem in einer Cave aus gleichmäßig verteilten Ventilatoren installiert, durch die die Simulation positions- und richtungsabhängiger und verschiedener Windarten möglich war. Nach der Interaktion der Nutzer mit dem Cave-System sollte ihr Präsenzepfinden in der virtuellen Umgebung ermittelt werden und mit der Simulation ohne Windeffekte verglichen werden. Als Präsenz wird die Erfahrung verstanden, sich in eine Umgebung versetzt zu fühlen, in der man sich zu diesem Zeitpunkt physisch nicht befindet. Bei einem vollimmersiven VR-System sollte es möglichst intensiv sein. Auf diesem Hintergrund wurden Fragebögen zur Ermittlung der subjektiv wahrgenommenen Präsenz der Nutzer in der Cave mit Windsimulation erstellt. Durch die Messung von Puls und Hautleitfähigkeit sollten darüber hinaus auch objektive Faktoren berücksichtigt werden. Sowohl die subjektiven, als auch objektiven Faktoren, haben in der Auswertung der Studie gezeigt, dass die Verwendung von Grafik, Klang und Haptik durch das Windsystem zu einer erhöhten Präsenz der Nutzer führte. Eine detailliertere Darstellung der Ergebnisse bietet die Abbildung 6.



**Abb. 6: Subjektive & objektive Nutzerpräsenz bei unterschiedlicher Sinnesansprache<sup>73</sup>**

Die Grafiken zeigen, dass sich die Nutzer sowohl beim subjektiven als auch dem objektiven Präsenzepfinden durch die visuelle, akustische und haptische Ansprache am stärksten

<sup>73</sup> FRÖHLICH & WACHSMUTH 2013, S. 10

durch die VR einbezogen fühlten (K1: Kondition visuell, K2: visuell-akustisch, K3: visuell-haptisch, K4: visuell-akustisch-haptisch, Prä: während der Vorbereitung, Pit: während des Aufenthaltes im Cave, Post: nach dem Aufenthalt). Fröhlich und Wachsmuth stellten damit fest, dass die Nutzung mehrerer Modalitäten in der VR sinnvoll ist, die Ansprache des Tastsinns allerdings vermutlich durch den arbeitsreichen Prozess der Erstellung haptischer Elemente häufig vernachlässigt wird<sup>74</sup>.

## 4.4 Anwendungsmöglichkeiten von Virtual- & Augmented Reality

Sowohl VR als auch AR-Systeme lassen sich nicht nur im Gaming, Entertainment und Infotainment Bereich einsetzen, sondern eignen sich auch für jegliche Branchen, in welchen Simulationen, etwa zu Trainingszwecken, eingesetzt werden. Dazu zählt u.a. die Flug- und Raumfahrtbranche, Automobilindustrie, Militär, jegliche Gebiete auf denen Prototypen- und Produktionsplanungen verwendet werden, in der Architektur und Landschaftsplanung sowie in der medizinischen und chirurgischen Ausbildung<sup>75</sup>. Hans-Jörg Bullinger fasste eine Auswahl von Bereichen zusammen, in denen VR-Elemente zum Einsatz kommen könnten:

- Entwicklung virtueller Prototypen in der Produktentwicklung mit visueller, auditorischer und haptische Repräsentation: VR-Systeme würden bei Planung und Design durch hohe Anschaulichkeit, kürzere Entwicklungszyklen und der Möglichkeit zur Teamkoordinierung helfen, e.g.: Entwicklung eines Fahrzeug-Cockpits oder Auto-Innenraum durch Simulation des Innenraums und Benutzung über ein Head-Mounted-Display
- Anwendungen in der Ausbildung mit virtuellen Objekten durch interaktive Demonstration, Simulationstraining, Exploration entfernter Orte, e.g.: Fahr- und Flugtraining in Simulatoren, besonders von Notsituationen, aus denen das Erlernete auf reale Situationen übertragen werden kann<sup>76</sup>.

---

<sup>74</sup> FRÖHLICH & WACHSMUTH 2013

<sup>75</sup> DÖRNER et al. 2013, S.22 ff

<sup>76</sup> BULLINGER et al. 1997

## 4.5 Eignung Haptischer Interfaces für Virtual- und Augmented Reality

Der Überblick über VR- und AR-Systeme hat gezeigt, dass besonders bei dieser Art von Computersystemen die Anforderungen an eine gelungene MMS hoch sind. Dies liegt daran, dass bei VR sowohl die Simulation, als auch die Interaktion möglichst realistisch und authentisch auf den Nutzer wirken sollen. Bei AR wiederum, darf die Realitätsanreicherung den Nutzer nicht daran hindern, natürlich mit der Umwelt und dem System zu interagieren. So ist der Aspekt der Mehrdimensionalität und Multimodalität bei der Ansprache des Nutzers besonders wichtig. Bei der Darstellung von 3D-Objekten etwa, ist die überzeugende Illusion der Realität spätestens dann nicht mehr gegeben, wenn man diese nicht auch anfassen oder greifen kann. Auch der Aspekt der natürlichen Interaktion mit dem System ist hochrelevant. Bereits 1995 stellen Gerda Smets et al. die Bedeutung passender Interaktionsschnittstellen für VR-Systeme heraus und beschreiben eine direkte Manipulation von Objekten, gegebenenfalls mit dem gesamten Körper des Nutzers, als wünschenswerte MMS<sup>77</sup>. Auch Bullinger et al. benennen die Direktmanipulation als Interaktionstechnik der Wahl für MMI in virtuellen Umgebungen und betonen die Eignung natürlicher, nicht zu erlernender und gestischer Interaktionsmöglichkeiten inklusive ihrer Mischformen<sup>78</sup>. Bei der Navigation durch virtuelle Umgebungen soll dem Benutzer die für ihn natürlichste Art der Steuerung ermöglicht werden, beispielsweise durch das Fortbewegen, bestimmte Arm- oder Beinbewegungen und das Positionieren des Kopfes und der Augen. Bewegt man sich in einer virtuellen Umgebung durch einen Controller oder Steuertasten statt die Umgebung tatsächlich zu begehen, wählt man Objekte mit einem Mausklick statt mit der Hand aus, steht dies im Widerspruch zur Interaktion mit tatsächlichen Umgebungen. Durch den Einsatz bereits vorhandener, nicht erlernter Fertigkeiten (wie der Umgang mit der Maus usw.) wird die kognitive Belastung in der MMI auf die für den Menschen auf das natürlich vorge-sehen Niveau beschränkt. Hierdurch kann gleichzeitig die Qualität der Kommunikation zwischen Mensch und Computer erhöht und natürlicher gestaltet werden. Bei den klassischen MMS erfolgt die Steuerung der Maschine in vielen Fällen noch kommandoorientiert. Bei der Direktmanipulation in virtuellen Umgebungen soll eben dies nicht der Fall sein; der Computer soll den Benutzer hinsichtlich seiner Position und Bewegungen passiv beobachten und entsprechend reagieren.

---

<sup>77</sup> SMETS et al. 1995

<sup>78</sup> BULLINGER et al. 1997

Durch die Eigenschaft des Menschen seine Umwelt zu einem hohen Maß haptisch zu erkunden, durch die Bewegung in ihr und das Greifen und Ertasten von Objekten (vgl. Kapitel 2), ist der Einsatz haptischer Interfaces als natürliche und *begreifbare* User Interfaces in VR und AR naheliegend und sinnvoll. Egal wie aufwendig und präzise die visuelle Darstellung und akustische Begleitung ist: fehlt die Haptik an den Stellen, wo sie in der Realität vorkommen würde, kann kein vollkommenes Abbild der Realität geschaffen werden. Ein komplementärer Gebrauch haptischer Elemente mit visuellen und auditiven Komponenten würde dieses Problem lösen, den Aspekt der Direktmanipulation erfüllen und sich positiv auf die Qualität von VR- und AR-Systemen auswirken. Die Untersuchung des Präsenzepfindens von Nutzern bei der Interaktion in einer CAVE mit physikalisch-haptischen Windsystem von Fröhlich und Wachsmuth kann als bestätigendes Beispiel angesehen werden.

In der Praxis bestehen die meisten VR und AR Systeme dagegen nach wie vor hauptsächlich aus audio-visuellen Elementen. Das MMI ist sowohl in diesen Fällen als auch im Allgemeinen durch den Einsatz visueller Reize geprägt. Besonders die grafische Darstellung von Realität ist schon so fortgeschritten, dass über den Sehsinn kaum mehr Steigerungen im Authentizitätsempfinden möglich sind. Leider wird besonders der Sehsinn heutzutage als in der Informationstechnologie überreizter Sinneskanal charakterisiert. Haptik bietet dagegen neue Möglichkeiten für interaktive Systeme und kann so als systemisch notwendig angesehen werden, damit in der MMI weitere Fortschritte erreicht werden können. Folglich kann man auch den Einsatz von Haptik als Interface für computerbasierte Systeme als zukunftsweisend betrachten. Dennoch erfolgt das Einbeziehen des Tastsinnes in der MMI nur recht zurückhaltend, was zum einen an den bisherigen technischen Limitationen bezüglich der Rechnerleistung und der Entwicklung einsatzfähiger Komponenten liegt, zum anderen auf die generell reservierte Haltung gegenüber der Haptik in der Wissenschaft zurückzuführen ist. Der Nutzen für Schnittstellen besonders aus der Kategorie der natürlichen (z.B. Touchscreen) und auch der anfassbaren Interfaces (reacTable, Gitarren-Controller) steht dennoch außer Frage. Das Potential von Technologien zur Präsentation von Informationen mit multimedialen Elementen in einer Virtual bzw. Augmented Reality-Umgebung zur visuellen, akustischen und haptischen Sinnesansprache und Interaktion wurde interdisziplinär hergeleitet und beschrieben. Heute finden Experimente mit NUI und TUI zunehmend die Aufmerksamkeit der IT-Branche und der Wissenschaft. Besondere Anerkennung erfährt dabei die Entwicklung von Simulations-Systemen, die ein haptisches Nutzerinterface bieten.

Dass eine Kombination aus visuellen, auditiven und haptischen Interaktionsmöglichkeiten für eine vollkommene MMI geeignet ist, lässt sich also aus den dargelegten Grundlagen der

Menschlichen Wahrnehmung, den im vorherigen Kapitel genannten Anforderungen an ein MM-System im Allgemeinen und die in diesem Kapitel charakterisierten Ansprüchen an realitätssimulierende und anreichernde Systeme im Speziellen ableiten. Die Einbindung des Tastsinns und die Entwicklung haptischer Systeme als Komplement zu visuellen und akustischen Reizen für ein multimodales MMI können demnach als sinnvoll und sogar als systemisch notwendig eingeschätzt werden. Diese wahrnehmungspraktische Vervollständigung von Nutzerinterfaces erscheint deshalb zukunftsweisend für die Weiterentwicklung und Optimierung von Mensch-Maschine-Systemen.

Anders als bei den gegenständlichen, begreifbaren Benutzerschnittstellen, bei denen es sich um physikalisch-haptische Interfaces handelt, grenzt die zentrale Fragestellung dieser Arbeit die Potenzialanalyse auf rein virtuell-haptische Benutzerschnittstellen ein. Deshalb kann die Hypothese dieser Arbeit durch die Feststellung der Eignung haptischer Interfaces, solange sie eine natürliche und nicht künstlich-spielerische Interaktion bieten, für MMI und VR-Systeme zwar unterstützt, aber noch nicht belegt werden. Dieser Schluss kann erst nach der Erläuterung der virtuellen Haptik in Abgrenzung zum Bereich physikalisch-haptischer Interfaces im nachfolgenden Kapitel erbracht werden.

## 5 Virtuelle Haptik

Nachdem bereits der Sinn und die systemische Notwendigkeit der Ansprache der haptischen Wahrnehmung durch den Gebrauch realer, haptischer Objekte als Benutzerschnittstelle in der Kommunikations- und Informationsvermittlung im Allgemeinen, sowie der MMI in Computersystemen, VR- und AR-Anwendungen im Speziellen festgestellt wurde, soll nun zusätzlich der Einsatz virtuell-haptischer Interfaces untersucht werden. Dafür wird im Folgenden zunächst der Begriff virtuelle Haptik bzw. virtuell-haptische Interfaces definiert. Es wird erläutert, wieso eine Differenzierung zwischen physikalisch-haptischen und virtuell-haptischen Interfaces sinnvoll ist und welche Vorteile letztere in der MMI bieten, bzw. in welchen Anwendungsszenarien ihr Einsatz bevorzugt werden sollte. Anschließend wird der Stand der Forschung auf diesem Gebiet beleuchtet; es wird ausgeführt wie sich virtuelle Haptik in der Informatik und Haptikforschung eingliedert und wie intensiv sich die Wissenschaft aktuell mit diesem Thema befasst. Zusätzlich werden soweit skizzierte Versuche der Gliederung und Kategorisierung verschiedener Arten von virtueller Haptik vorgestellt. Anschließend werden die technischen Grundanforderungen an Haptik-simulierende Systeme im Allgemeinen thematisiert. Schließlich werden Beispielprojekte und –Arbeiten vorgestellt, in denen Haptik-simulierende Systeme entwickelt wurden oder zum Einsatz kamen. Anhand der so festgestellten Eigenschaften und Anwendungsziele virtueller Haptik können mögliche Anwendungsgebiete und -Szenarien identifiziert und zusammengefasst werden. Daraufhin kann abschließend die Eignung virtueller Haptik als Interface in der MMI beurteilt werden, um damit die zentrale Fragestellung dieser Arbeit vollständig zu beantworten.

### 5.1 Definition virtuelle Haptik & virtuell-haptische Interfaces

Nachdem die Begriffe Virtual Reality, Haptik und Interfaces bzw. Benutzerschnittstellen in den vorangegangenen Kapiteln bereits definiert wurden, können diese nun kombiniert werden. Gleichzeitig soll eine Definition der Begriffe virtuelle Haptik und virtuell-haptische Interfaces erfolgen, die das zentrale Thema dieser Arbeit darstellen. Virtuell-haptische Interfaces können als Benutzerschnittstellen in der Mensch-Maschine-Interaktion verstanden

werden, die das Gefühl eines aktiven haptischen Empfindens durch computerbasierte virtuelle Simulationen erzeugen. Die Interaktion des Nutzers mit dem Computersystem erfolgt also durch das Anfassen nicht realer (aber meist real-simulierter) Objekte. Das so simulierte haptische Empfinden kann als virtuelle Haptik bezeichnet werden. Auch Martin Grunwald definiert diesen Begriff in seinen Arbeiten, in denen er die technischen Anwendungsmöglichkeiten der Haptikforschung vorstellt und in diesem Zuge die Entwicklung von Haptik-simulierenden Systemen nennt<sup>79</sup>:

„Der schon zur eigenständigen Technologie entwickelte Begriff virtuelle Haptik vereint verschiedene Versuche, haptische Wahrnehmungen durch geeignete, externe, virtuelle Simulatoren zu erzeugen.“

Acosta et al. vom Department of Computer Science an der Texas Tech University bezeichnen in einem Projektbericht über die Entwicklung und Anwendung eines virtuell-haptischen Interfaces dieses als Mensch-Maschine-Schnittstelle, die das Anfassen computergenerierter Objekte ermöglicht, sodass eine haptische Virtual Reality entsteht<sup>80</sup>:

“(Virtual) Haptics is a human computer interface technology that permits touch and manipulation of imaginary computer-generated objects in a way that evokes a compelling sense of tactile "realness." With this technology one can touch objects that exist only in a computer. These interactions might be as simple as touching a virtual wall or button, or as complex as performing a critical procedure in a surgical simulator.”

Srinivasan et al. benutzen in einer wissenschaftlichen Ausarbeitung über die Forschungsschwerpunkte des MIT Touch Labs die Begriffe machine haptics und im Speziellen computer haptics gleichbedeutend. Sie definieren sie als einen Forschungsbereich der Informatik zur Entwicklung virtuell-haptischer Umgebungen und Anwendungen<sup>81</sup>:

---

<sup>79</sup> GRUNWALD, 2009 S.14

<sup>80</sup> ACOSTA et al. 1999, S.2

<sup>81</sup> SRINIVASAN et al. 2006, S. 148

“Our research into machine haptics includes work on computer haptics – which, like computer graphics, involves the development of the algorithms and software needed to implement haptic virtual environments – as well as the development of haptic devices.”

Die Definition virtuell-haptischer Interfaces zeigt einen einfachen aber dennoch prägnanten Unterschied zu physikalisch-haptischen Benutzerschnittstellen: während erstere dem Nutzer die Möglichkeit geben durch computergenerierte, virtuelle Objekte mit dem System zu interagieren und das Tasterlebnis an sich simuliert wird, sind die Objekte beim zweiten Typ physikalisch vorhanden, materiell und real, genauso wie auch das Tasterlebnis.

Diese Eigenschaften machen virtuell-haptische Objekte besonders interessant für den Einsatz in virtuellen Umgebungen, da so zum einen Objekte generiert werden können, die es in der Realität nicht gibt (bzw. die nicht real nachgebildet werden können, z.B. Prototypen von Produkten, Entwürfe usw.) oder die am jeweiligen Ort nicht vorhanden sind. Zum zweiten können virtuelle Welten und Simulationen im wahrsten Sinne *begriffen* und so um die Modalität des Tastens ergänzt werden, ohne ihre Virtualität zu verlieren. Eine VR kann nur als solche bezeichnet werden, wenn sie vollständig computergeneriert ist. Physikalisch-haptische Interfaces würden definitorisch dazu führen, dass die Umgebung nicht mehr virtuell ist, sondern es sich um eine Mischform zwischen virtueller und realer Welt (AR) handelt. Konkretere Anwendungsmöglichkeiten werden im nächsten Kapitel thematisiert. Die Benennung der Szenarien an dieser Stelle unterstreicht allerdings bereits die Vorteile und das Potential virtuell-haptischer Interfaces und begründet die weitere Auseinandersetzung mit dem Thema. Dazu wird im nächsten Kapitel der Stand der Forschung im Bereich virtuelle Haptik dargelegt, um das aktuelle Interesse der Wissenschaft festzustellen und Kategorisierungsversuche verschiedener Haptik-simulierender Technologien sowie die grundlegenden technischen Anforderungen zu beschreiben.

## 5.2 Stand der Forschung & Entwicklung Virtueller Haptik

Nach der Definition virtuell-haptischer Interfaces und der Abgrenzung zu physikalisch-haptischen Benutzerschnittstellen soll in diesem Kapitel der Stand der Forschung auf dem Gebiet virtueller Haptik vorgestellt werden. Es bleibt festzuhalten, dass es als relativ junges, jedoch anerkanntes Forschungsfeld in der Informatik und Haptikforschung bezeichnet werden kann. In seinen Ausarbeitungen reflektiert Grunwald den Stellenwert virtueller Haptik

in der Forschung und Gesellschaft und stellt fest, dass trotz der großen Relevanz des Tastsinnessystems, technische Anwendungsmöglichkeiten wie Haptik-simulierende Systeme kaum öffentlich diskutiert werden. Dies bedeutet allerdings nicht, dass Haptikforscher das Thema nicht interessiert – weiterhin stellt Grunwald fest, dass in der aktuellen Tastsinnesforschung der größte Anteil der Labore und Forschungsinstitute sich der technisch-praktischen Perspektive widmen, da ein großes Interesse an der Weiterentwicklung von VR-Systemen und der Robotik besteht<sup>82</sup>:

„Eine Gegenüberstellung der weltweit tätigen Anzahl von Arbeitsgruppen dieser Fachgebiete ergab, dass heute 60% der Haptikforscher in den genannten Bereichen arbeiten. Dabei ist ein nach oben offener Trend zu beobachten. Die Faszination des Tastsinnessystems für die Robotik und Virtuelle Haptik ist dabei eine notwendige Folge der technischen Entwicklung.“

Auch wird deutlich, dass es bereits eine Vielzahl an entwickelten und genutzten Technologiearten gibt, die durch verschiedene Methoden und Funktionsweisen haptische Empfindungen simulieren. Diese sind sowohl für den Einsatz in Simulatoren und VR gedacht, als auch in der Robotik. In dieser Arbeit wird der Aspekt des Einsatzes virtueller Haptik in der Robotik zunächst ausgeklammert, da er nicht im Vordergrund dieser Ausarbeitung steht. Deshalb folgt im Weiteren eine Fokussierung auf das erste Einsatzgebiet. Eine Auswahl von Beispielprojekten und Entwicklungen von Haptik-simulierenden Systemen für diesen Anwendungsbereich wird im nächsten Kapitel vorgestellt, um das Konzept von virtuell-haptischen Interfaces veranschaulichen zu können. Zunächst sollen an dieser Stelle die ersten Versuche der Haptikforschung genannt werden, die Arten virtuell-haptischer Interfaces zu kategorisieren. Außerdem werden die technischen Grundanforderungen an diese Systeme vorgestellt.

### 5.2.1 Arten Haptik-simulierender Technologien

Da virtuelle Haptik als Forschungsfeld in der technischen Haptikforschung bzw. in der MMI-Forschung als verhältnismäßig neuartig bezeichnet werden kann, gibt es noch keine einheitliche, international durchgesetzte Kategorisierung der verschiedenen Haptik-simulierenden

---

<sup>82</sup> GRUNWALD, 2009 S. 13

Technologien, wie es etwa bei den verschiedenen Interface-Arten in der MMI (vgl. Kapitel 3.2 und 3.3) der Fall ist. Allerdings haben einige Wissenschaftler bereits verschiedene Möglichkeiten zur Erzeugung virtueller Haptik festgestellt und versucht diese methodisch zu differenzieren.

Generell ist festzuhalten, dass alle Haptik-simulierenden Technologien in der Lage sein müssen ein haptisches Feedback zu erzeugen, sobald der Nutzer mit ihnen bzw. der Umgebung die sie erzeugt, interagiert. Für die gesamte Interaktion ist Feedback grundsätzlich erforderlich, damit diese per Definition überhaupt stattfinden kann. Im Fall des haptischen Feedbacks muss der Nutzer das virtuelle Objekt berühren können und eine Reaktion des Objekts auf seine Berührung erhalten. Zum haptischen Feedback gehören sowohl das Taktile- als auch das Force Feedback. Ersteres ermöglicht das Begreifen der Oberfläche und vermittelt Wärme, Vibration und Struktur des berührten Objekts. Das zweite gibt Informationen zum Verhalten des Objekts bei der physikalischen Einwirkung, ob es federt, fest ist, sich bewegt oder auch wie schwer es ist. Ebenso sind alle virtuell-haptischen Interfaces sowohl Eingabe- als auch Ausgabemedium bzw. Input-Output-Schnittstellen, d.h. sie tracken die physischen Aktionen des Nutzers am virtuellen Objekt (Input) und reagieren gleichzeitig mit der Wiedergabe realistischer Tastreize und Verhaltensweisen des Objekts (Output)<sup>83</sup>. Mehrere Möglichkeiten die Technologien zu unterscheiden und zu klassifizieren, die Haptik simulieren, beschreibt Srinivasan in einer seiner Arbeiten. Er unterteilt sie nach:

1. Intensitätsgrad des physischen Kontakts des Nutzers mit dem Interface: Je geringer der physischer Kontakt des Nutzers ist, desto komplexer muss der virtuelle Kontakt simuliert werden. Er unterscheidet zwischen Technologien, die den physischen Kontakt komplett simulieren müssen, und denen, die weniger komplexe virtuelle Berührungen ermöglichen (e.g. das Berühren eines soliden Gegenstandes im Gegensatz zum Drücken eines elastischen, virtuellen Balls).
2. Direkter und Indirekter Manipulation des virtuellen Objekts durch den Nutzer: Kann das virtuelle Objekt durch den Nutzer (Hand, Finger etc.) angefasst werden, spricht er von direkter Manipulation. Ist dies durch ein physisch vorhandenes Objekt möglich, welches der Anwender benutzen muss um virtuelle Objekte anfassen zu können, handelt es sich um eine Tool-Manipulation.
3. Dem Standort bzw. der Verankerung der Haptik-simulierenden Technologie: Devices, die eine feste Position im Raum haben um virtuelle Haptik zu erzeugen, wer-

den world-grounded devices genannt (e.g. kraftrückkoppelnde Roboter, Joysticks, Tools). Dagegen sind body-grounded Devices direkt am Körper des Nutzers und erzeugen so ein haptisches Empfinden virtueller Objekte (e.g. Exoskelett, VR-Handschuh, VR-Weste, Controller). Zusätzlich nennt Srinivasan in dieser Kategorie noch Taktile Displays, die bei Berührungen nicht etwa nur Vibrationen von sich geben, sondern die passende Textur der jeweils grafisch angezeigten Oberfläche simulieren.<sup>84</sup>

Obwohl eine einheitliche Unterteilung Haptik-simulierender Technologien noch nicht anerkannt wurde, werden einige von Srinivasan Kategorisierungsversuchen von anderen Wissenschaftlern aufgegriffen und übernommen.

Thorsten Kern greift beispielsweise die 2. Differenzierungsmöglichkeit auf und unterscheidet in seiner Arbeit bei der haptischen Interaktion in VR zwischen direkter und indirekter Interaktion. Die direkte haptische Interaktion macht für ihn die perfekte haptische VR aus.<sup>85</sup>

„Im Ideal eines perfekten haptischen Displays könnte der Benutzer direkt mit allen Objekten der virtuellen Umgebung fühlbar interagieren: beim Greifen entsteht ein haptischer Eindruck an Fingern und Handfläche genau in dem Moment, zu dem der Kontakt mit dem zu greifenden virtuellen Objekt aufgenommen wird. Die Finger der Hand sind ebenso wie alle anderen Körperteile ganz frei in der Bewegung bis auf die Einschränkungen, die von der virtuellen Umgebung erzeugt werden. Überall am Körper können haptische Reize erzeugt werden. Dies wird direkte haptische Interaktion genannt.“

Allerdings beschreibt er ebenfalls den damit verbundenen hohen technischen Aufwand und erkennt die indirekte haptische Interaktion mit einer virtuellen Umgebung mittels „Tool“ als Kompromiss an, der bereits für viele Haptik-Geräte verwendet wird. Er leitet dies von einem Ansatz ab, den er als „Tool-Handle-Metaphor“ bezeichnet. Zwar ist damit eine Einschränkung des Nutzers verbunden, allerdings können so mit weniger technischem Auf-

---

<sup>83</sup> BERKLEY 2003

<sup>84</sup> SRINIVASAN, 2014 S.102-103

<sup>85</sup> KERN 2009 S. 421

wand trotzdem nützliche und sinnvolle Haptiksimulationen geschaffen werden. Dies gilt beispielsweise für passende Situationen, in denen auch in der Realität Instrumente benutzt werden, um etwas zu betasten (z.B. Stift, Werkzeug):

„Dieses Konzept sieht vor, dass man die virtuelle Umgebung nicht mehr direkt mit den Fingern, sondern mittelbar über einem Gegenstand ertastet, den man in der Hand hält. Es ist, als würde man mit einem Stift die Umgebung berühren anstatt mit der Fingerspitze.“<sup>86</sup>

Auch die Unterscheidung Haptik-simulierender Technologien nach ihrer Verankerung (3.) wird in der Wissenschaft aufgegriffen und i.a. durch Jeffrey Berkley angewendet. Er differenziert haptische Devices zur Interaktion mit VR zwischen ground-based devices (gleichbedeutend mit world-based) und, entsprechend der vorherigen Unterscheidung, body-based devices<sup>87</sup>.

Grunwald scheint dagegen eine übergeordnete Kategorisierung von Haptik-simulierenden Technologien zu implizieren. Statt nach verschiedenen Möglichkeiten der physikalischen Erzeugung von haptischem Feedback zu differenzieren, fasst er diese zusammen zur Technologie die elektro-mechanische Reize in Form von Force- und Tactile-Feedback erzeugt und unterscheidet zwischen ihr und der Technologie zur Simulation haptischer Reize durch neuronale Hirnstimulation. Ohne eine Unterarten explizit auszubilden, beschreibt Grunwald die vielfältigen Möglichkeiten zur Erzeugung elektro-mechanischer Reize durch die Technologie<sup>88</sup>:

„Die Bandbreite reicht von Aktoren, die direkt auf die menschliche Haut, Gelenk bzw. Muskulatur einwirken und hierdurch haptische Empfindungen von virtuellen Objektberührungen auslösen bis hin zu neusten Entwicklungen die durch ein strukturiertes Ultraschallfeld Druckreize auf die menschliche Hautoberfläche ausüben. Die Vielzahl solcher virtuellen Systeme koppeln die haptischen Eindrücke der Reizgeber mit optischen und akustischen Signalen, sodass erstaunliche Wahrnehmungseffekte erzielt werden können.“

---

<sup>86</sup> ERN 2009 S. 421

<sup>87</sup> BERKLEY 2003 S. 2-3

<sup>88</sup> GRUNWALD 2009 S. 14 ff

Zusätzlich stellt er heraus, dass sich die Entwicklung dieser Technologien noch im Anfangsstadium befindet und sich zahlreiche weitere Möglichkeiten ergäben solche Devices und Systeme zu optimieren:<sup>89</sup>

„Die aktuellen und zukünftigen Grenzen solcher Simulationssysteme sind relativ und ergeben sich prinzipiell aufgrund mechanisch-elektrischer Komponenten, die für die direkte mechanische Übertragung der Reizkonfigurationen z.B. auf das Hand-Finger-System notwendig sind. [...] Grundsätzlich wird dieser Technologiebereich noch lange nicht erschöpft sein, vielmehr [...] stehen der Perfektionierung haptisch virtueller Szenarien nur unterlassene Versuche neuer technischer Umsetzungen im Wege. Ebenso lassen verschiedene militärische Anwendungsbereiche der virtuellen Haptik vermuten, dass die Richtung und die Dynamik der zukünftigen Entwicklungen längst nicht abzusehen ist.“

Die zweite Kategorie der Haptiksimulation durch direkte neuronale Hirnstimulation beschreibt Grunwald als Versuch in der Haptikforschung, die bisher noch nennenswerten Limitationen durch mechanische Technikkomponenten zu umgehen, indem diese nicht optimiert, sondern weitgehend überflüssig gemacht werden. Dies soll möglich sein, indem haptische Empfindungen durch einen Mikrochip im Gehirn des Nutzers durch die Stimulation des jeweiligen Hirnareals erzeugt werden:

„Die technischen Beschränkungen sind derzeit noch hinreichend groß, so dass in einigen Laboratorien schon lange die Vision einer direkten neuronalen Kopplung zwischen dem neuronalen System des Menschen und externer sensorischer Informationen diskutiert und untersucht wird. Im Rahmen dieser Vision sollte es möglich sein, dass haptische Eindrücke der Außenwelt auf adäquate Weise codiert und als elektrisches Reizmuster dem neuronalen System des Menschen durch direkte Hirnstimulation übertragen wird. Im

---

<sup>89</sup> GRUNWALD 2009 S. 14 ff

Ergebnis solcher neuronal-virtuellen Stimulation sollte der auf diese Weise stimulierte Mensch haptische Wahrnehmungen generieren, die einer natürlichen haptischen Stimulation durch eine reale physische Umwelt gleicht. Die Forschung ist auf diesem Gebiet erst am Anfang, aber es zeigen sich bereits Entwicklungslinien die den Beobachter aufmerken lassen.“<sup>90</sup>

Auch nennt er die Risiken und Schwierigkeiten, besonders aus moralischer und ethischer Sicht, die sich beim Einsatz dieser Technologie ergeben. Eine detailliertere Beschreibung soll allerdings im nächsten Kapitel bei der Thematisierung einiger Beispielprojekte und Technologien erfolgen.

Die Betrachtung der Kategorisierungsversuche Haptik-simulierender Systeme durch die Wissenschaft hat gezeigt, dass es zwar nach wie vor keine international anerkannte Norm gibt, die diese ordnet, aber dennoch einige Möglichkeiten existieren, die bereits vermehrt Anwendung finden. Zusätzlich wird die Vielzahl an Technologien deutlich, die virtuelle Haptik erzeugen können. Es zeigt sich eine Tendenz, möglichst Device/Tool-freie Anwendungen entwickeln zu wollen, die dem Nutzer maximale Bewegungsfreiheit bieten. Gleichzeitig wird die Tatsache transparent, dass wegen aktueller technischer Grenzen entsprechend Kompromisse gemacht werden müssen; so etwa, dass auch Device/Tool-basierte Systeme je nach Anwendungsszenario als Lösungsoption anerkannt werden. Die grundlegenden technischen Anforderungen an solche Systeme und deren VR-Implementierung werden nachfolgend vorgestellt. Anschließend folgt eine Veranschaulichung verfügbarer und notwendiger Technologien anhand der Vorstellung einiger Beispielprojekte im nächsten Kapitel.

### **5.2.2 Technische Grundanforderungen an Haptik-simulierende Systeme**

Obwohl es verschiedene Möglichkeiten gibt, virtuelle Haptik zu erzeugen, können grundlegende technische Anforderungen genannt werden, die für alle diese Möglichkeiten gelten. Diese Anforderungen an Systeme, die durch elektro-mechanische Reize Force- und Tactile-Feedback erzeugen, werden im Folgenden vorgestellt.

---

<sup>90</sup> GRUNWALD 2009 S. 14 ff

Grundsätzlich sollten Haptik-simulierende Technologien je nach Anwendungszweck in bestehende VR-Systeme integriert werden können. Die technischen Komponenten und Funktionsprinzipien solcher Systeme wurden bereits im Kapitel 4.2 vorgestellt. Zur Ergänzung des VR-Systems um die Interaktionsmöglichkeit mit virtuell-haptischen Objekten reicht es nicht, lediglich ein Haptik-simulierendes Device im VR-System zur Verfügung zu stellen. Beide Systeme, sowohl das meist visuell-akustische VR-System als auch das haptische VR-System, können nur verknüpft miteinander funktionieren. Passt beispielsweise das Bild nicht zum simulierten Tastempfinden oder andersherum, wirkt die computergenerierte Umgebung auf den Nutzer nicht mehr realistisch.

Um diese Verknüpfung zu gewährleisten, muss die Architektur bestehender VR-Systeme meist modifiziert werden. Bei einer Neuentwicklung multimodaler VR-Systeme mit virtuell-haptischen Elementen muss eine Architektur entworfen werden, die diesen Ansprüchen gerecht wird – eine Synchronisation und Wechselwirkung aller Elemente zur Ansprache der jeweiligen Sinne muss möglich sein. Die Elemente e.g. Sensoren, die die Position und die Aktionen des Nutzers tracken, müssen e.g. mit den Wiedergabemedien für die grafische Darstellung oder das haptische Feedback koordiniert werden:<sup>91</sup>

„Das System muss Funktionalität für Multithreading und / oder Verteilung mit Synchronisationsmechanismen bereitstellen, um eine Entkopplung des höherfrequenten Haptikaktualisierungsrhythmus von den Zyklen für Applikationsverhalten und graphischer Darstellung zu ermöglichen.“

Je nachdem, wie der Nutzer mit einem virtuellen Objekt interagiert, müssen Tast- und visuelles Erlebnis passend ausgespielt werden, e.g. beim Drücken eines virtuellen Balls muss dieser optisch entsprechend verformt dargestellt werden, während der Nutzer einen authentischen Widerstand spürt. Dies passiert durch Algorithmen zur Kollisionserkennung und Berechnung physikalischer Gesetzmäßigkeiten:

„Darüber hinaus müssen im VR-System Datenstrukturen und Algorithmen für exakte Kollisionserkennung zwischen haptischen Proben und virtuellen Objekten vorhanden sein, sowie physikalische

---

<sup>91</sup> KERN 2009 S. 451 ff

Modelle zur Berechnung von Kollisions- oder Reibungskräften. Sollen die in der Haptik-Simulation berechneten Kräfte wiederum Auswirkungen auf die virtuelle Umgebung haben, so sind Instanzen für physikalische Simulationen zu Festkörperdynamik, Deformationsverhalten usw. in die virtuelle Szene einzubauen und mit den Objekten der Szene zu verknüpfen. Beim entstehenden Datenfluss ist besonderes Augenmerk auf die Synchronisation der verschiedenen Module zu legen.“

Durch die Tatsache, dass haptische Devices sowohl Eingabe- als auch Ausgabegerät darstellen, müssen sie in der Lage sein, besonders schnell auf die Aktionen des Nutzers zu reagieren. Dies sollte in Echtzeit erfolgen, i.e. das haptische Gerät sollte fortlaufend kontrollieren (in Kontrollschleife), ob eine Aktion erfolgt.<sup>92</sup>

Es kann zusammengefasst werden, dass für die Integration virtueller Haptik in VR-Systemen die Synchronisation der verschiedenen Sinnesansprachen durch die einzelnen Systeme, die Wiedergabe passender Reaktionen sowohl optischer als auch haptischer Natur der virtuellen Objekte nach physikalischen Gesetzmäßigkeiten und zuletzt der Echtzeit-Aspekt der Geräte zur Erkennung der Nutzeraktionen im System von großer Bedeutung sind. Da in diesem Kapitel lediglich die technischen Grundanforderungen an elektro-mechanisch arbeitenden Technologien zur Erzeugung eines haptischen Feedbacks im Allgemeinen dargestellt werden sollten, muss auf eine detailliertere Betrachtung des Themas an dieser Stelle verzichtet werden.<sup>93</sup> Zur Veranschaulichung Haptik-simulierender Technologien werden im nächsten Kapitel einige virtuell-haptische Devices und Geräte kurz vorgestellt. Die technischen Funktionsweisen der einzelnen Beispiele sollen dagegen detaillierter thematisiert werden.

---

<sup>92</sup> KERN 2009 S. 451 ff

<sup>93</sup> Eine detailliertere Betrachtung der technischen Anforderungen kann dem Kapitel 13.2 von „Entwicklung Haptischer Geräte“ von Kern entnommen werden (vgl. KERN 2009 S. 407 ff)

## 5.3 Beispielprojekte & Entwicklungen virtuell-haptischer Interfaces

Das vorangegangene Kapitel hat gezeigt, dass die Erforschung und Entwicklung virtueller Haptik durchaus wissenschaftliches Interesse weckt. Überzeugende Gründe für die weitere Forschung, wie eingangs dargelegt, gibt es ausreichend. Das Potenzial des Forschungsfeldes ist sowohl vielseitig, als auch hinreichend nachvollziehbar, wodurch verständlich wird, dass sich einige Wissenschaftler speziell der Untersuchung Haptik-simulierender Technologien gewidmet haben. Zusätzlich konnte gezeigt werden, dass eine Vielzahl unterschiedlicher Technologien existiert, die virtuelle Haptik erzeugen können. Zwischen der Idealvorstellung eines perfekten, virtuell-haptischen Systems und den heutigen technischen Möglichkeiten, müssen nach wie vor häufig praktikable Kompromisse gefunden werden. Die Implementierung virtueller Haptik in ein VR-System konnte als nicht trivial herausgestellt werden, da aus beiden Systemen ein einheitliches geschaffen werden muss. Um nun konkret die aktuellen technisch-praktischen Entwicklungen Haptik-simulierender Systeme veranschaulichen zu können, wird eine Auswahl an Beispielprojekten und Anwendungen vorgestellt. Dabei soll darauf hingewiesen sein, dass die Zusammenstellung von Beispielen im Rahmen dieser Arbeit auf dem Hintergrund der Vielzahl bereits existierender Anwendungen keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt. Die erläuterte, grobe Kategorisierung Haptikerzeugender Systeme wird im Folgenden berücksichtigt, sodass die vorgestellten Beispiele jeweils in die passende Technologieart eingegliedert werden können. Da die technischen Grundanforderungen bereits im vorherigen Kapitel beschrieben wurden, soll nun eine detailliertere Betrachtung der technischen Funktionsweise der einzelnen Anwendungen erfolgen. Nach der Darstellung der Beispiel-Technologien zur Erzeugung virtueller Haptik können Anwendungsszenarien abgeleitet werden, um eine konkretere Bewertung des Potenzials für die MMI zu ermöglichen.

### 5.3.1 PHANToM als Beispiel für Force Feedback Devices

Als ein Beispiel für ein elektro-mechanisches Device zur Simulation von Tastempfindungen im Sinne des Force-Feedbacks (Kraftrückkopplung & -Widerstand) bei der Interaktion mit virtuellen Objekten, das zu den kommerziell erfolgreichsten Anwendungen dieser Art zählt, kann PHANToM benannt werden. Der Name des Geräts steht für Personal Haptic Interface Mechanism. Es wurde 1993 am MIT von Kenneth Salisbury und Srinivasan entwickelt und

stetig überarbeitet, sodass sich heute eine ganze Reihe von Geräten dieser Art auf dem Markt befindet. Durch die verschiedenen Versionen der Geräte gibt es durchaus Unterschiede in ihrer Handhabung, allerdings lassen sich die meisten PHANToM Devices der Kategorie der Tool-basierten Geräte zuordnen (vgl. Kapitel 5.2.1 Punkt 2 der Unterscheidungsarten Haptik-simulierender Technologien nach direkter und indirekter Manipulation), wobei es auch Modelle gibt die beinahe eine direkte Manipulation ermöglichen. Ebenfalls haben alle PHANToM Geräte die Gemeinsamkeit, dass es sich um world/ground-based Devices handelt, sie also eine feste Verankerung in der jeweiligen Umgebung haben (vgl. Punkt 3 Unterscheidungsarten nach Verankerung)<sup>94</sup>.

Konkret handelt es sich bei PHANToM um einen Roboterarm, der bei den meisten Anwendungsszenarien auf dem Schreibtisch neben dem Computerbildschirm platziert wird und dort mit dem Computersystem verbunden werden kann. Durch einen fingerhutähnliche Vorrichtung oder einen stiftartigen Controller kann der Nutzer, (fast<sup>95</sup>) direkt oder indirekt über den Tool-Ansatz, virtuelle Objekte berühren und mit ihnen in Interaktion treten indem das Gerät durch Krafterückkopplung ein haptisches Feedback erzeugt. Abbildung 7 zeigt zwei PHANToM-Geräte in der Anwendung.



Abb. 7: PHANToM Modelle mit Tool- und Direktmanipulation<sup>96</sup>

Die Entwickler des Devices, Srinivasan und Salisbury, beschreiben PHANToM in einer projektbeschreibenden Arbeit folgendermaßen<sup>97</sup>:

<sup>94</sup> SALISBURY & SRINIVASAN 1997

<sup>95</sup> Durch die fingerhutähnliche Vorrichtung ist eine fast direkte virtuelle Berührung möglich. Es ist allerdings unklar, ob dies schon als direkte Manipulation angesehen werden kann oder der Tool-basierte Ansatz umgesetzt wird. Bei einer strengen Definition direkter Manipulation kann diese in diesem Fall als nicht gegeben betrachtet werden.

“The Phantom haptic interface is a device that lets you literally feel virtual objects with your hands. It sits conveniently on your desktop next to your computer, looking a bit like a miniature desk lamp. The Phantom haptic interface has a stylus grip or a fingertip thimble with which users can reach into virtual worlds to touch and interact with 3D objects. The resulting sensations prove startling, and many first-time users are quite surprised at the compelling sense of physical presence they encounter when touching virtual objects.”

Der mechanische Arm wird vom Anwender über das Endstück (Stift oder Fingerhut) bedient. Wird der Stift bzw. Finger in der Vorrichtung bewegt, wird die ausgeübte Kraft des Nutzers in die virtuelle Welt übertragen. Dieser Mechanismus kann als Eingabegerät genutzt werden. PHANToM besitzt sechs Stufen der Positionserfassungsfreiheit, die die freien Bewegungen aus sechs Winkeln ermöglichen und so eine besonders hohe, natürliche Manövrierfreiheit für den Anwender erzeugen. Gleichzeitig erlaubt die mechanische Verbindung von Nutzer und System ein genaues Tracking der Bewegungen. So kann der Nutzer frei Manöver ausführen ohne vom Device an sich gestört zu werden:<sup>98</sup>

“The Phantom interface allows and measures motion along six degrees of freedom. Because the device does not constrain motions within its workspace, and because its inertia and friction are low, free motion feels free and comfortable. These device characteristics also let users feel the objects without being distracted by the device.”

Damit PHANToM als Ausgabegerät funktioniert, ist der ganze Roboterarm mit Motoren versehen, sodass Kraftrückmeldungen aus der virtuellen Welt an den Nutzer geleitet werden können. Diese erzeugen vielfältige, haptische Feedbacks, je nachdem welche Wiedergaben für eine realistische haptische Abbildung des virtuellen Objekts nötig sind. Die Eigen-

---

<sup>96</sup> SENSABLE, 2016

<sup>97</sup> SALISBURY, SRINIVASAN 1997 S. 6

<sup>98</sup> SALISBURY, SRINIVASAN 1997 S. 6

schaften des jeweiligen virtuellen Objekts müssen dafür im Computersystem digital nachgebildet werden, sodass das Device die geometrischen und physikalischen Parameter des haptischen Feedbacks simulieren kann. Jeder digitalen Information über die Eigenschaften des virtuellen Objekts ist eine passende Motorenaktion zugeordnet. Eine Vielzahl an Algorithmen zur Ausgabe der Form-, Oberflächen- und Bewegungsinformationen wurde dazu im Device implementiert. Die Aktionen des Nutzers, die durch das Eingabegerät getrackt werden, werden in empfundener Echtzeit mit entsprechenden Feedbacks kombiniert und ausgegeben. Erfolgt das haptische Feedback zeitversetzt zur Aktion des Nutzers, kann kein realistischer Eindruck erzeugt werden. So hat die Entwicklung von PHANToM zu einem Bedarf für die Generierung und Abbildung künstlicher, haptischer Stimulationen durch Computersysteme geführt:<sup>99</sup>

„This simple device has spawned a new field analogous to computer graphics— computer haptics—defined as the discipline concerned with the techniques and processes associated with generating and displaying synthesized haptic stimuli to the human user.”

Eine Anwendung, die das Generieren virtuell haptischer Objekte durch PHANToM erleichtert, wurde von Eric Acosta et al. vom Department of Computer Science an der Texas Tech University entwickelt. Dabei handelt es sich um ein Plugin, genannt G2H, welches basierend auf herkömmlicher Grafik- und Animationssoftware in Kombination mit PHANToM virtuell-haptische Objekte erzeugen kann. Es werden aus Informationsdaten von Grafiken und 3D-Modellen haptische Objekte konvertiert, die dann durch das PHANToM Device angefasst werden können. Auch werden die dynamischen Veränderungen des Objekts durch die Manipulation des Nutzers vom Plugin berechnet und wiedergegeben. Durch diese, im Vergleich zum Neu-Programmieren, einfache Handhabung virtuell-haptischer Objekte durch Konvertieren zu erzeugen, bietet G2H eine wertvolle Ergänzung zum bestehenden PHANToM System.<sup>100</sup>

Die Funktionen der PHANToM Geräte reichen an und für sich aus um Nutzern ein realistisches Tasterlebnis virtueller Objekte zu bieten. In Kombination mit akustischen und vor allem visuellen Darstellungen lassen sich Simulationen erzeugen, die den Ansatz von VR in

---

<sup>99</sup> SALISBURY, SRINIVASAN 1997 S. 6

einer Form erfüllen, welche ohne die Ansprache des Tastsinns bislang nicht möglich war. Für dieses haptische Device ist etwa der Einsatz mit einem HMD wie der Oculus Rift denkbar, die dem Nutzer ein umfassendes virtuelles Abbild einer Umwelt präsentieren könnte, bei dem das Device selbst für den Nutzer nicht mehr sichtbar ist. Der Einsatz dieser Kombination ist praktikabel und wird in Trainingssimulatoren verschiedener Branchen bereits angewandt<sup>101</sup>.

Besonders häufig wurde PHANToM auch zu Trainings- und Simulationszwecken im medizinisch-chirurgischen Bereich verwendet, etwa bei komplexen Trainingsoperationen im Rahmen der Ausbildung angehender Chirurgen. Dabei wird der PHANToM-Controller wie chirurgisches Instrument verwendet, während die mechanisch-elektronischen Reize entsprechende haptische Eindrücke durch Vibrations- und Kraftrückkopplung vermitteln. Die zeitgleiche Generierung passender optischer Daten in der jeweiligen virtuellen Szene, etwa von Gewebe oder Organen, komplementiert die Simulation. So kann der Chirurg nicht nur sehen, was passiert wenn er bestimmte Handlungen am virtuellen Patienten ausführt, sondern diese auch spüren.

Als Beispiel kann ein 2008 durch die Zusammenarbeit der Universität Magdeburg und des Universitätskrankenhauses Leipzig durchgeführter Versuch angeführt werden, bei dem der Einsatz von PHANToM bei der virtuellen Endoskopie zur Planung derartiger Eingriffe untersucht wurde.



Abb. 8: Versuchsaufbau einer simulierten Endoskopie mit PHANToM im Vergleich<sup>102</sup>

<sup>100</sup> ACOSTA et al. 1999

<sup>101</sup> SALISBURY, SRINIVASAN 1997

<sup>102</sup> KRÜGER et al. 2008

Im Vordergrund standen der Vergleich verschiedener Interfacearten (Tastatur, Maus, Trackball, Spaceball, Grafiktablett und PHANToM) und eine Bewertung dieser hinsichtlich des Nutzerempfindens. Für das Testszenario wurde eine Endoskopie der Nasennebenhöhlen simuliert. Die Teilnehmer mussten zur Bewertung einem vorgegebenen Operationspfad folgen der typisch für den Eingriff ist und die verschiedenen Devices als Controller testen. Abbildung 8 zeigt den Versuchsaufbau, links mit kombinierten Eingabegeräten, rechts mit PHANToM.

Die objektive Genauigkeit der Nutzer, etwa wie weit sie vom vorgegebenen Pfad abwichen, wurde ebenso festgehalten, wie ihre subjektiven Empfindungen im Rahmen einer Befragung zu den jeweiligen Steuerungsarten. Bei der Benutzung von PHANToM konnte festgestellt werden, dass die durch das haptische Feedback unterstützte Navigation mit PHANToM nennenswert besser bewertet wurde, als die anderen getesteten Navigationstechniken. Dieses Ergebnis kam zustande, obwohl alle Nutzer die Handhabung von klassischen Eingabegeräten wie Tastatur und Maus gewohnt waren, aber keine Erfahrungen mit Force-Feedback Devices hatten. Eine Darstellung der Ergebnisse zeigt Abbildung 9.

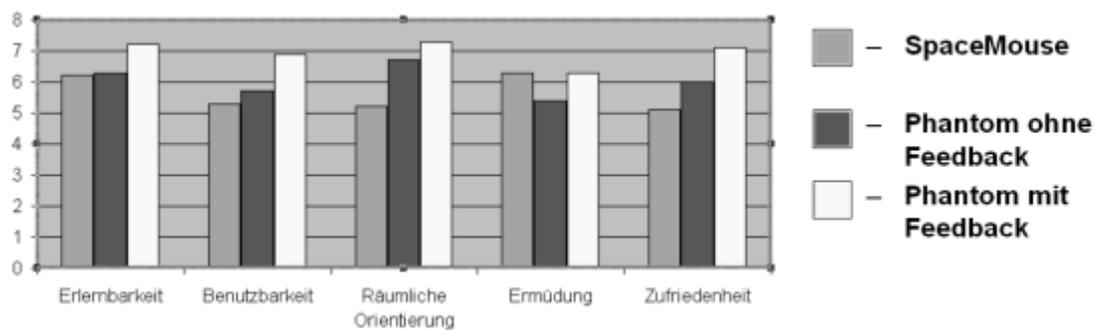


Abb. 9: Navigation mit PHANToM im Vergleich (hohe Werte = bessere Wertungen)<sup>103</sup>

Auch das Benutzerfeedback hinsichtlich Eingewöhnungszeit, der räumlichen Orientierung, der Bedienbarkeit und der Interaktion an sich fiel positiver aus. Neben dieser positiven, subjektiven Einschätzung der Nutzer, konnte auch eine Leistungssteigerung im Hinblick auf die Genauigkeit der Teilnehmer bei der Benutzung von PHANToM als Device festgestellt werden. Im Rahmen dieses Versuches konnte so gezeigt werden, dass der Einsatz virtueller Haptik Vorteile gegenüber bisherigen Simulationsversuchen durch visuelle Reize bietet. Die vorgestellte, medizinische VR-Simulation konnte besonders durch die Kombination dieser

<sup>103</sup> KRÜGER et al. 2008

Reize positive Ergebnisse erzielen. Wenn die Testpersonen nicht nur sehen konnten, was mit dem virtuellen Patienten während der Trainingsoperation passierte, so scheint es, sondern den eigenen Handgriffen ein entsprechendes Feedback zugeordnet wurde, war die Vorbereitung auf die reale Situation weitaus effektiver.

Zu ähnlichen Ergebnissen bei der Eignung von Force-Feedback Devices, im Speziellen vom PHANToM, beim VR-Simulationstraining im medizinischen Bereich und Teleoperationsszenarien kamen i.a. auch Grigore Burdea et al 1998<sup>104</sup>.

Der vorliegende Anwendungskontext zu PHANToM als Force-Feedback Device und seine entsprechenden Ergebnisse, haben gezeigt, dass PHANToM als Beispiel für eine Haptik-simulierende Technologie zwar nicht perfekt ist (e.g. da Direktmanipulationen nach dem Device-Free Ansatz nicht möglich sind), sie aber für bestimmte Verwendungszwecke äußerst geeignet ist. VR-Simulationen, bei denen der Nutzer auch in der Realität vergleichbare Tools (Pinsel, chirurgische Instrumente etc.) in der Hand halten muss und über dieser ein haptisches Feedback erhält, erscheinen bei der Übertragung auf das PHANToM-Endstück durchaus realitätsnah. Natürlich kann durch PHANToM allein keine vollkommene VR-Simulation stattfinden. In Kombination mit anderen VR-Technologien wie etwa Head-Mounted-Displays, die eine passende visuelle Umgebung zum Tasterlebnis schaffen können, stellt PHANToM eine geeignete Option zur ergänzenden Haptiksimulation dar.

### **5.3.2 Airborne Ultrasound Tactile Display zur Device-freien Manipulation**

Ein weiteres Beispiel für Haptik-simulierende Force-Feedback Technologien stellt das Airborne Ultrasound Tactile Display zur Erzeugung haptischer Hologramme und VR-Objekten durch Ultraschalldruckwellen dar. Es wurde 2008 von Hiroyuki Shinoda et al. an der University of Tokyo als portables Display zu Verwendung etwa auf Tischen oder an Decken entwickelt. Es zeichnet sich besonders dadurch aus, dass es als erstes Gerät eine Device-freie haptische Manipulation virtueller Objekte ermöglicht. Somit kann es als ein ground-based Gerät zur direkten Interaktion verstanden werden. Die Forscher um Shinoda et al. stellten fest, dass der Einsatz von Force-Feedback Systemen mit physikalischen Devices, wie etwa Handschuhen oder Tools (Controllern), die dauerhaft oder bei Bedarf in Hautkontakt mit dem Nutzer treten, sich störend auf die Realitätssimulationen im VR-System auswirken. Je

---

<sup>104</sup> BURDEA et al. 1998

freier der Nutzer bei der Interaktion mit dem Gerät ist, desto natürlicher und realistischer ist sein Eindruck<sup>105</sup>:

“There have been a lot of interactive systems which aim to enable the users to handle 3D graphic objects with their hands. If tactile feedback is provided to the user’s hands in 3D free space, the usability of those systems will be considerably improved.”

Eine mögliche Lösung für eine Device-freie Force Feedback Methode auf Distanz, etwa durch Luftdrüsen, wurde als unzureichend abgelehnt, da nur ein eher grobes und damit ebenfalls unrealistisches haptisches Feedback erzeugt werden konnte. Stattdessen kann eine realistische Simulation von Haptik bei virtuellen Objekten durch das Airborne Ultrasound Tactile Display als erstes seiner Art erzeugt werden. Dabei handelt es sich konkret um ein Display, welches Ultraschallwellen nutzt, um ein realistisches taktisches Feedback zu generieren. Zur Simulation von Haptik durch Ultraschallwellen kommt das Ultraschallphänomen Acoustic Radiation Pressure zum Einsatz, also der (akustische) Schallstrahlungsdruck. Der so auf die Handoberfläche des Nutzers erzeugte Druck vermittelt das Gefühl, dieser könne das virtuelle Objekt spüren<sup>106</sup>:

“The airborne ultrasound tactile display is designed to provide tactile feedback in 3D free space. The display radiates airborne ultrasound, and produces high-fidelity pressure fields onto the user’s hands, without the use of gloves or mechanical attachments.”

Der Prototyp des Airborne Ultrasound Tactile Displays besteht aus 324 Ultraschallsendern die eine Resonanzfrequenz von 40 kHz, Vibrationen von bis zu 1kHz und einen Druck von bis zu 1,6 Gramm erzeugen können. Das so generierte haptische Feedback ist realistischer, feiner und kontrollierbarer als etwa beim Einsatz von Luftdrüsen. Abbildung 10 zeigt einen Prototyp des Ultraschall-Displays in Verwendung, bei der man es als Gerät mit einer „wabenähnlichen“ Gestaltung erkennen kann. Rechts wird die Anordnung schemenhaft verdeutlicht.

---

<sup>105</sup> SHINODA et al. 2008 S. 1

<sup>106</sup> SHINODA et al. 2008 S.1

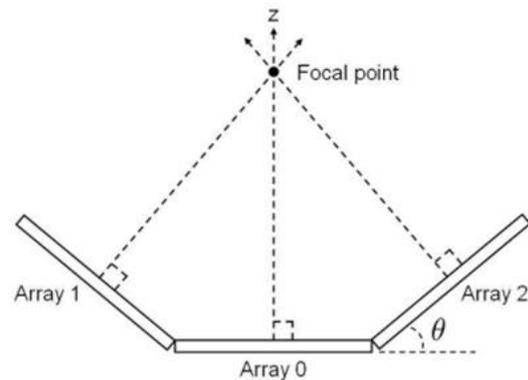
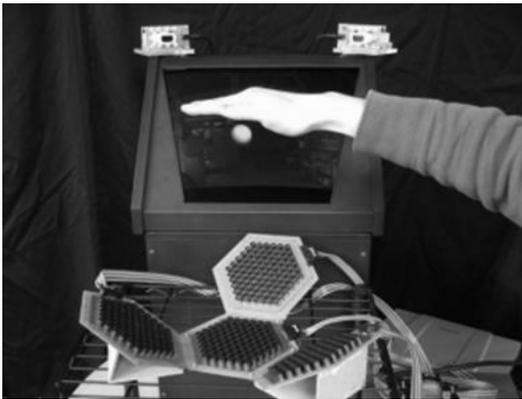


Abb. 10: Prototyp & Darstellung des Airborne Ultrasound Tactile Displays<sup>107</sup>

Um virtuelle Haptik durch das Display erzeugen zu können, muss es in Kombination mit anderen technischen Systemen zu einem VR-System ausgebaut und darin implementiert werden. Eine Möglichkeit wäre die Anwendung des Displays zur Erzeugung haptischer Hologramme, wie es Shinoda et al. es 2009 gemacht haben<sup>108</sup>:

„The components of the developed interaction system (...) consist of a holographic display, a hand tracker, and a mid-air tactile display”

Zur Erzeugung eines optischen Hologramms, wurde als Holographisches Display Holo des US-Anbieters Provision verwendet. Dieses nutzt einen Konkavspiegel um Bilder eines LCD-Displays etwa 30 cm vor seiner Oberfläche frei im Raum schweben zu lassen. Dadurch entsteht die Illusion eines dreidimensionalen Objekts, welches allerdings bei Berührung durch den Betrachter kein taktiles Feedback erzeugt. Zum Nachverfolgen der Handposition des Nutzers beim Kontakt mit dem Hologramm wurden Nintendo Wii-Motes verwendet und als drittes Element zum VR-System hinzugefügt. Die Wii-Motes basieren auf einer Infrarot-Sensorenteknologie, durch die mittels Verwendung eines retro-reflektiven Markers am Finger des Nutzers, ein simples Hand-Tracking-System entsteht. So wird gewährleistet, dass der Druck durch die Ultraschallwellen erst dann erzeugt wird, wenn der Nutzer entsprechend mit dem Hologramm in Kontakt tritt.

Werden diese drei Elemente miteinander zu einem synchronisierten System verknüpft (visuelle Darstellung passend zur haptischen bei entsprechender Aktion des Nutzers), kann

<sup>107</sup> SHINODA et al. 2009

<sup>108</sup> SHINODA et al. 2009 S.1

der Nutzer mit den virtuell-haptischen Hologrammen interagieren. Das so entwickelte System ermöglicht es die Technik der klassischen, optischen Holografie ohne die Verwendung von störenden Devices durch den Aspekt der Berührbarkeit zu erweitern. So kann eine sowohl visuell, als auch haptisch ansprechende Simulation von Realität generiert werden. Es wird allerdings auch deutlich, dass weitere Forschung nötig ist, etwa um bei dieser Technologie den akustischen Schall zu minimieren und den Druck der Ultraschallwellen zu steigern. Die Entwicklung des Geräts kann als eine technische Innovation verstanden werden, bei der Forschungs- und Optimierungsbedarf besteht. Shinoda et al. geben auch einen Überblick über mögliche Anwendungsszenarien des Airborne Ultrasound Tacticle Displays:<sup>109</sup>

„Our airborne ultrasound tactile display is designed to provide tactile feedback for the users of 3D modeling software, video games and so on.“

Generell kann der Ersatz von Abbildungen physikalischer Objekte durch virtuelle, mit denen man visuell und haptisch interagieren kann, einen ökonomischen und ökologischen Vorteil darstellen. Für gewisse Branchen könnten beispielsweise haptisch simulierte aber funktionale Knöpfe und Schalter denkbar sein. Speziell in hygienisch sensiblen Bereichen wie Kliniken und Krankenhäusern erschienen derartige Lösungen sinnvoll. Offensichtlich scheint dagegen der Einsatz dieser Technologie in der Unterhaltungsindustrie, etwa bei Filmen oder Videospiele, für eine noch authentischere Realitätssimulation und ein damit verbundenes, intensiveres Erlebnis. Auch für Kunstinstallationen oder Rauminstallationen könnten berührbare virtuelle Objekte relevant sein, wie sie in VR-Systemen zum Einsatz kommen, sei es zu Lehr-, Entertainment-, oder Informationszwecken.

Einen praktischeren und kommerzielleren Ansatz verfolgt das 2013 ursprünglich an der University of Bristol in England gegründete Unternehmen Ultrahaptics. Es hat ebenfalls ein taktilen Display entwickelt, welches durch Ultraschalldruckwellen haptische Reize direkt an der Hautoberfläche des Nutzers erzeugen kann, ohne dass dieser von einem Device abhängig ist<sup>110</sup>:

---

<sup>109</sup> SHINODA et al. 2008 S.1

<sup>110</sup> ULTRAHAPTICS, 2016

“Ultrahaptics has developed a unique technology that enables users to receive tactile feedback without needing to wear or touch anything. The technology uses ultrasound to project sensations through the air and directly onto the user. Users can ‘feel’ touchless buttons, get feedback for mid-air gestures or interact with virtual objects.”



Abb. 11: Ultraschall-Display von Ultrahaptics<sup>111</sup>

Abbildung 11 zeigt das Display von Ultrahaptics in der Benutzung ergänzend zum Computer. Daran kann man erkennen, dass die Funktionsweise vergleichbar zum Airborne Ultrasound Tactile Display ist. Als mögliche Anwendungen nennen die Hersteller jegliche Szenarien, bei denen etwa Knöpfe und Regler für eine natürliche Interaktion mit Maschinen benötigt werden, ohne unbedingt physikalisch vorhanden sein zu müssen. Abbildung 12 zeigt Beispiele für solche Situationen. So könnten virtuell-haptische Bedienelemente die realen bei der Steuerung von Fahrzeugen ersetzen oder sich in alltäglichen Haushaltsgeräten wie dem Herd befinden. Ein Einsatz zu Entertainmentzwecken im Gaming und VR-Bereich in Kombination mit andern VR-Technologien wie HMDs wird ebenfalls thematisiert<sup>112</sup>:

„From invisible buttons and dials that you feel when you need them, through to tangible interfaces that track your hand, this elegant and simple technology was created using complex mathe-

<sup>111</sup> ULTRAHAPTICS, 2016

<sup>112</sup> ULTRAHAPTICS, 2016

matics yet is based on human nature. Ultrahaptics can be used anywhere we interact with technology to feel virtual worlds, or get feedback from gesture control.”

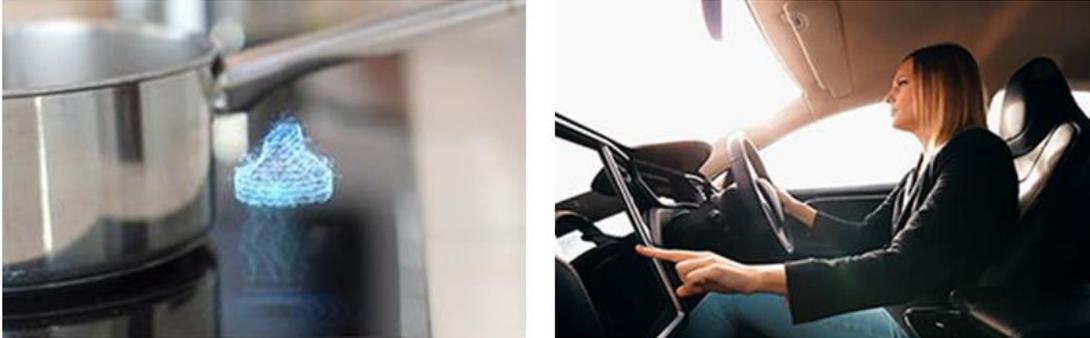


Abb. 12: Einsatzmöglichkeiten des Ultrahaptics-Displays<sup>113</sup>

Schon die Beschreibung der Ultraschall-Displays, sowohl des Airborne Ultrasound Tactile Displays als auch des Ultrahaptics Gerätes, zeigt, dass diese Entwicklungen eine besondere Stellung unter den elektro-mechanischen Force-Feedback Systemen einnehmen. Sie zeichnen sich dadurch aus, dass der Nutzer ohne Devices wie Handschuhe, Exoskelett, Controller etc. direkt das virtuelle Objekt „berühren“ kann. Dies ist deshalb besonders erstrebenswert, da die Illusion von Realität nicht durch störende Geräte und damit verbundene Bewegungseinschränkungen zerstört wird. Zwar müssen auf diesem Gebiet noch Maßnahmen ergriffen werden um diese Technologie zu verbessern, schon heute kann allerdings festgestellt werden, dass die so mögliche, völlig freie Interaktion mit virtuellen Objekten in vielen Bereichen einen Vorteil bietet. Dies gilt etwa wenn man sich die Bedienung eines rein virtuellen, aber funktionierenden Lichtschalters als MM-Schnittstelle in einem Krankenhaus vorstellt.

### 5.3.3 Stiftbasierte Haptography-Tools als Tactile-Feedback Devices

Eine weitere Möglichkeit virtuelle Objekte haptisch erfahrbar zu machen stellt das Erzeugen eines taktilen Feedbacks dar, welches im Gegensatz zum Force-Feedback die Texturen der Oberfläche des virtuellen Objekts simuliert und nicht nur die Kraftrückkopplung und Widerstände wiedergibt. Diesem Prinzip widmen sich Katherine Kuchenbecker et al. von der Haptics Group des GRASP Labs an der University of Pennsylvania, da sie eine realistische

<sup>113</sup> ULTRAHAPTICS, 2016

Abbildung haptischer Objekte nur in Kombination mit einer authentischen Wiedergabe ihrer Oberflächenbeschaffenheit anerkennen. Sie entwickelten 2011 die Haptographie (Haptography) als Methode zur Aufnahme der Haptik eines realen Objekts und der Wiedergabe dieser an einem virtuellen Objekt durch stiftähnliche Tools:<sup>114</sup>

“Haptography, like photography in the visual domain, enables an individual to quickly record the haptic feel of a real object and reproduce it later for others to interact with in a variety of contexts.”

Dabei wird zunächst das reale Objekt mit einem bewegungsempfindlichen, sensorischen, stiftartigen Tool durch Bewegungen und Berührungen auf natürliche Weise erforscht, so wie es der Nutzer auch mit seiner Fingerspitze machen würde. Die Position, Ausrichtung und ausgeübte Kraft auf die Oberfläche werden durch das Stiftende getrackt, um so die haptischen Parameter des Objekts zu berechnen. Diese Parameter beinhalten etwa wie weich das Material ist, ob es Erhebungen und Tiefen gibt und ob die Oberfläche glatt oder klebrig ist:<sup>115</sup>

„The system collects multiple data streams throughout this interaction—all of the touch-based sensations that can be felt by a human hand holding a tool—including quantities such as the translation and rotation of the stylus and the object, the forces and torques applied to the object’s surface, and the three-dimensional high frequency accelerations of the tool tip. Haptography focuses on capturing surface attributes that are not readily apparent by sight, such as friction, texture, stiffness, and stickiness.”

Diese Daten werden anschließend digital codiert und gespeichert. Das digitale Abbild der Oberflächeneigenschaften des Objekts stellt das Haptogramm dar. Gibt man das reale Objekt nun virtuell aus, kann dieses durch die Wiedergabe der haptischen Daten über ein haptisches Ausgabegerät mit simulierenden Vibrationen „berührt“ werden. Die Qualität der

---

<sup>114</sup> KUCHENBECKER et al. 2011 S.1

<sup>115</sup> KUCHENBECKER et al. 2011 S.4

wiedergegebenen haptischen Reize ist dabei abhängig von den elektro-mechanischen Kapazitäten und Feinheiten des Ausgabegeräts<sup>116</sup>:

“An acquired haptographic model can be explored via any kinesthetic haptic interface, but the flexibility of the interaction and the quality of the haptic response will greatly depend on the mechanical, electrical, and computational design of the chosen system.”

Die Wiedergabe der haptischen Reize erfolgt u.a. durch Kontrollalgorithmen, die Daten aus dem Haptogramm in Abhängigkeit von den Bewegungen des Nutzers ausgeben, etwa wie schnell er das Device bewegt. Somit kann man bei der Haptographie von einer Methode sprechen, die eine indirekte Manipulation durch Tools ermöglicht. Ob das haptische Interface als ground- oder body-based bezeichnet werden kann, hängt davon ab, welches Gerät für die anschließende Ausgabe eingesetzt wird. Denkbar wäre der Einsatz eines PHANTOM Devices (ground-based) oder ebenfalls eines freien, flexiblen, stiftartigen Tools, das als body-based bezeichnet werden kann.<sup>117</sup> Abbildung 13 zeigt eine schematische Darstellung der Funktionsweise der Haptographie, von der Aufnahme des taktilen Feedbacks beim realen Objekt, über die Digitalisierung der haptischen Daten im Haptogramm, bis hin zur Wiedergabe bzw. Simulation des Tastempfindens bei einem virtuellen Objekt durch Vibration:

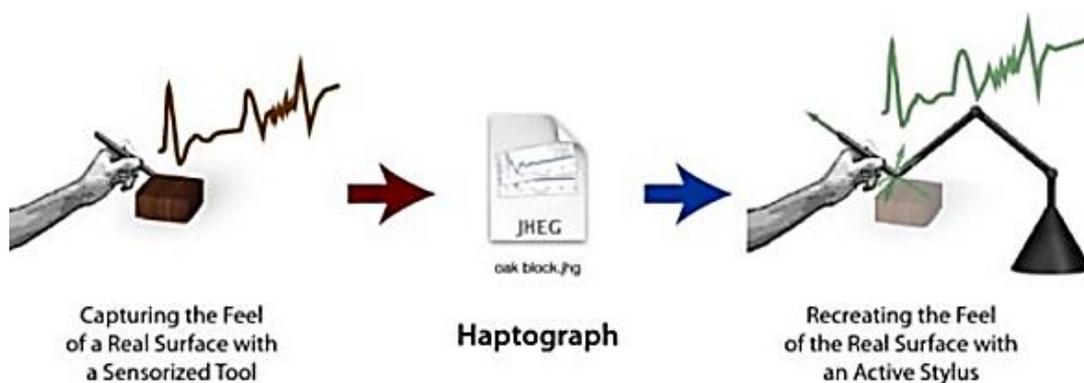


Abb. 13: Schematische Darstellung des Haptographie-Prinzips<sup>118</sup>

<sup>116</sup> KUCHENBECKER et al. 2011 S. 4

<sup>117</sup> KUCHENBECKER et al. 2011

<sup>118</sup> KUCHENBECKER et al., 2011

Als mögliche Anwendungsgebiete nennen Kuchenbecker et al. zahlreiche Bereiche in denen Simulationen und Trainings-Anwendungen durch haptisches Feedback optimiert werden können, bei denen gleichzeitig der Aspekt des taktilen Feedbacks bzw. der Erkennung von Oberflächendifferenzen besonders relevant ist. Denkbar wäre der Einsatz im medizinischen Bereich, im Speziellen bei Teleoperationen auf Distanz (Diese Technologie könnte auch in der Raumfahrt, der Kernkraftindustrie oder jeglichen Branchen angewendet werden, in denen ein direkter Zugang zum jeweiligen Objekt nicht möglich ist. Stattdessen wäre eine Wiedergabe der Aktionen des Nutzers am virtuellen Objekt in Echtzeit auf das reale Objekt übertragbar) oder bei der Zahnmedizin. Durch passende Simulatoren könnte Fachpersonal im Vorhinein besser ausgebildet werden. So könnten Zahnärzte in Ausbildung beispielsweise ein virtuelles Gebiss nach Oberflächenhärte untersuchen, um so Indizien für einen Kariesbefall am Zahn festzustellen. Da das virtuelle Gebiss wie im realen Kontext mit einem Instrument betastet würde, wäre eine realitätsnahe Simulation möglich, die werdende Zahnärzte adäquat auf reale Praxisuntersuchungen vorbereiten könnte. Zum Einsatz für Lehr- und Unterhaltungszwecke wäre diese Technologie durchaus sinnvoll, etwa für Museen oder Galerien, in denen verhindert werden muss, dass die Besucher die realen Objekte anfassen. Ein virtuelles Abbild dieses Objektes würde die haptische Interaktion zulassen ohne dass Schäden am Original entstünden. Eine solche Haptiksimulation wäre auch für Nutzer interessant, die häufig Waren online kaufen, da es ihnen so möglich wäre, beispielsweise das virtuelle Textillabbild des Kleidungsstückes zu ertasten.<sup>119</sup>

„Particular positive ramifications of establishing the approach of haptography are to let doctors and dentists create haptic records of medical afflictions such as a decayed tooth surface to assist in diagnosis and patient health tracking; to improve the realism and consequent training efficacy of haptic surgical simulators and other computer-based education tools; to allow a wide range of people, such as museum goers and online shoppers, to touch realistic virtual copies of valuable items; to facilitate a haptographic approach to low-bandwidth and time-delayed teleoperation, as found in space exploration; and to enable new insights on human and robot touch capabilities.”

---

<sup>119</sup> KUCHENBECKER et al., 2011, S.4

Einen ähnlichen Ansatz inklusive passender Hardware verfolgten die Designer für berührbare MM-Schnittstellen Götz Wintergerst und Ron Jagodzinski von der Hochschule für Gestaltung Schwäbisch Gmünd. An ihr wird schwerpunktmäßig unter dem Namen Tangible Interaction Research erforscht, wie man die visuelle Welt durch den Tastsinn ergänzen und diesen i.a. in die Interaktion mit Geräten und Computern einbinden kann. Das Unternehmen, nuilab, welches von Wintergerst und Jagodzinski 2012 zur Entwicklung haptischer Interfaces in multimodalen, interaktiven Systemen gegründet wurde, wurde von der Hochschule als erstes eigenes Spin-Off anerkannt. Dort entwickelten sie i.a. ein einfaches handliches Device, das über den Einsatz simpler Vibrationen zur Haptiksimulation hinausgeht und zusätzlich mechanische Einzelimpulse erzeugen kann, welche in Amplitude und Frequenz unabhängig steuerbar und somit besonders gut regulierbar und flexibel sind – den STT 01 Small Tactile Transducer. Dadurch, dass der Aktuator durch Schwingungen vibriert, kann nicht nur die Geschwindigkeit und Stärke der Vibration bestimmt werden, sondern auch ihre Frequenzen, Dynamik und Komplexität. Der STT 01 kann in eine Vielzahl weiterer elektronischer Geräte eingebaut und so vielfältig genutzt werden<sup>120</sup>. Wintergerst und Jagodzinski verbauten den Aktuator i.a. in einem Stiftprototyp, durch den virtuelle Oberflächen haptisch begreifbar gemacht wurden – dem Hap.pen. Dieser ist, wie bei dem Projekt von Kuchenbecker et al. ein tool-basiertes Device, welches in der Anwendung als body-based kategorisiert werden kann. Der Hap.pen transferiert haptische Eigenschaften von grafischen Elementen, die auf einem berührungssensitiven Bildschirm dargestellt werden in haptisches Feedback durch Vibration und mechanische Impulse. Dies geschieht mithilfe eines Photon-Sensors, der die Photon-Dichte des angezeigten grafischen Elements ermittelt. Die so gesammelten Informationen, etwa über die Farbe und Helligkeit, werden dann durch den Hap.pen in einen entsprechenden Leitungsstrom übersetzt und an den STT 01 als Aktuator weitergeleitet, der passende Vibrationen und Reize wiedergibt. So werden den Informationen über das grafische Element haptische Informationen entnommen und entsprechend durch den Stift simuliert. Eine haptische Erfahrung des auf dem Bildschirm dargestellten virtuellen Objekts ist so möglich<sup>121</sup>. Abbildung 14 zeigt ein Hap.pen Modell, welches mit der fingerähnlichen Spitze die haptische Erfahrung ermöglicht.

---

<sup>120</sup> TLB, 2016

<sup>121</sup> WINTERGERST et al. 2011 S.1



Abb. 14: Hap.pen als Haptik-simulierendes, stiftbasiertes Tool<sup>122</sup>

Die Erfinder des STT 01 und der Hap.pens sehen vielfältige Einsatzmöglichkeiten dieser Geräte in der MMI<sup>123</sup>:

„Der Aktuator könnte sehr unterschiedlich eingesetzt werden. Denkbar sind alle Bereiche der MMI. Durch die geringe Baugröße und den geringen Energiebedarf ist der Aktuator prädestiniert für die Einbindung in mobile Geräte, jedoch nicht auf diese beschränkt. Zusätzliche Anwendungsgebiete liegen z.B. im Bereich der Teleoperation oder der Erweiterung von Gamecontrollern.“

Dieser Bezug auf stiftbasierte, haptische Devices zur Erzeugung eines taktilen Feedbacks zeigt, dass neben der Haptiksimulation durch Force-Feedback auch die Wiedergabe von Oberflächeneigenschaften und Texturen für eine authentische Virtuelle Haptik entscheidend ist und im Idealfall komplementär zu Force-Feedback Devices eingesetzt werden sollte. Es ist allerdings ebenso deutlich geworden, dass eine taktile Simulation aus IT-technischer Perspektive durchaus komplex ist. Eine device-freie bzw. nicht tool-basierte, taktile Simulation ist durch elektro-mechanische Geräte aktuell kaum möglich, sodass stiftbasierte Tools heute besondere Aufmerksamkeit verdienen. Ähnlich wie bei PHANTOM muss ihr Einsatz zum Nutzungskontext passen, etwa in Situationen, in denen die Benutzung eines Stiftes oder Werkzeuges ohnehin natürlich ist. In diesen Fällen ist der Einsatz dieser Technologien als MM-Schnittstelle durchaus empfehlenswert.

---

<sup>122</sup> WINTERGERST et al. 2011 S.1

<sup>123</sup> Vgl. TLB, 2016

### 5.3.4 Haptik-Simulation durch Mikrochips zur neuronalen Hirnstimulation

Als letztes Beispiel soll nun eine Methode vorgestellt werden, bei der keine elektro-mechanischen Force- oder Tactile-Feedback-Geräte zum Einsatz kommen, sondern virtuelle Haptik durch neuronale Hirnstimulation erzeugt wird. In Kapitel 5.2.1, im Rahmen der Kategorisierung Haptik-simulierender Technologien wurde bereits deutlich, dass diese Methode einen vollständig andersartigen Ansatz verfolgt, als alle bisher vorgestellten Konzepte. Sie entstand aus der Beobachtung, dass bei der Erzeugung virtueller Haptik durch elektro-mechanische Devices trotz bereits großer technologischer Fortschritte immer noch Kompromisse bei der Entwicklung gemacht werden müssen und weiterhin großer Optimierungsbedarf besteht. Durch Haptiksimulation mithilfe neuronaler Hirnstimulation wird dieses Problem umgangen. Das Prinzip wurde in einer Zusammenarbeit des MIT Touch Labs mit der Duke University in Durham, North Carolina, im Jahr 2011 entwickelt. Dabei werden haptische Empfindungen durch einen Mikrochip im Gehirn des Nutzers durch die Stimulation des jeweiligen Hirnareals erzeugt. Hierfür werden haptische Eindrücke aus der realen Welt auf dem Mikrochip codiert und als ein elektrisches Reizmuster, ähnlich dem natürlichen Wege via Sinneszellen (vgl. Kapitel 2.2), durch direkte Hirnstimulation auf das neuronale System übertragen. So soll der Nutzer durch die neuronal-virtuelle Stimulation, einer natürlichen haptischen Stimulation entsprechend, haptisch wahrnehmen.<sup>124</sup> Die so erzeugten haptischen Wahrnehmungen können für eine Vielzahl möglicher Virtual Reality-Szenarien eingesetzt werden. Der Mikrochip könnte etwa Programme beinhalten, die auf bestimmte audio-visuelle VR-Anwendungen abgestimmt sind, sodass je nach Handlung und Interaktionsmöglichkeit, ein passendes haptisches Feedback erfolgen kann. Obwohl diese Methode nicht vergleichbar mit elektro-mechanischen Systemen für haptisches Feedback ist, kann das Endergebnis des haptischen Empfindens des virtuellen Objekts als eine ideale Simulation verstanden werden. Sie bietet eine device-freie, direkte Interaktion, die weder ground- noch body-based, sondern „brain-based“ ist und auch in der Detailtreue und Vielfalt von realistischen, haptischen Empfindungen authentisch simuliert werden kann.

Die konkreten Versuche zur neuronalen Haptiksimulation des Touch Labs wurden bislang an Affen vorgenommen. Ihnen wurde der entsprechend codierte, fernsteuerbare Mikrochip im Gehirn implantiert. Durch Stromimpulse in bestimmten Gehirnarealen konnte das Versuchstier so e.g. ein Objekt in seiner Hand spüren, welches nicht physikalisch vorhanden war. Die Affen wurden trainiert virtuelle Objekte die optisch auf einem Display angezeigt

---

<sup>124</sup> Vgl. GRUNWALD, 2009

wurden, zu erkunden, indem sie nach dem Brain-Computer-Interface Prinzip durch ihre Gedanken, die als Hirnimpulse an das Computer-System übertragen wurden, einen ebenfalls auf dem Bildschirm dargestellten Arm steuerten. In dem Moment, in dem sie mit dem virtuellen Arm das ebenfalls virtuelle Objekt berührten, spürten sie durch die Impulse des Mikrochips im somatosensorischen Cortex dasselbe taktile Feedback, als berührten sie ein physikalisches Objekt. Abbildung 15 zeigt das Prinzip der neuronal-haptischen Simulation in einer schematischen Darstellung – der Affe bewegt über das BCI seinen virtuellen Arm (die alternative Steuerung über einen physikalischen Controller wird auch dargestellt, dient allerdings Kontrollzwecken und wird nicht weiter thematisiert). Gelingt der Kontakt mit dem virtuellen Objekt folgt das künstliche, haptische Feedback durch den Mikrochip<sup>125</sup>.

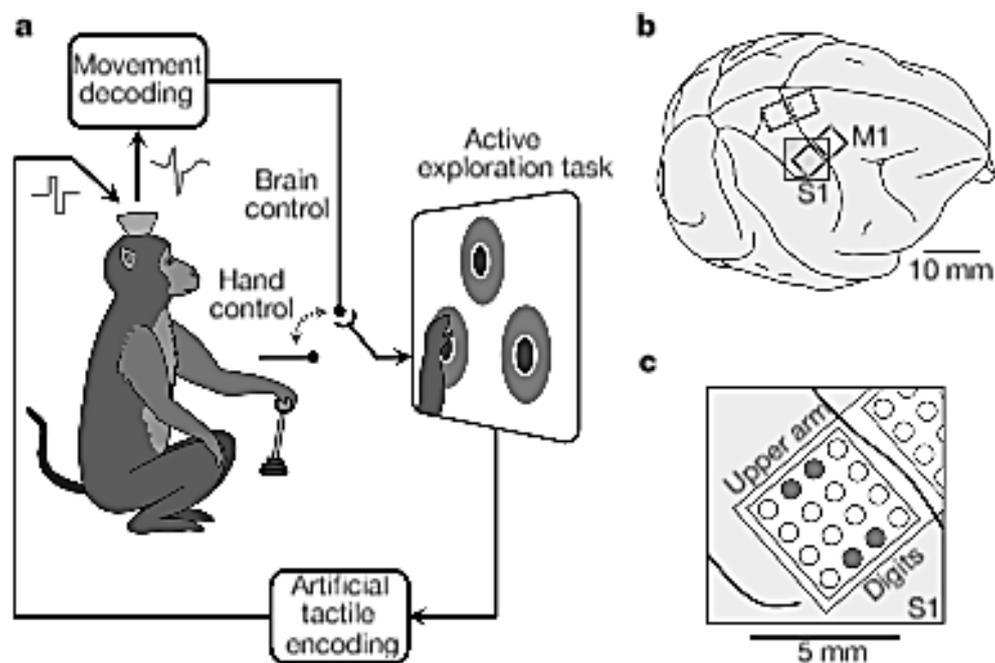


Abb. 15: Schematische Darstellung neuronal-haptischer Simulation<sup>126</sup>

Durch die besondere Eigenschaft dieser Methode ergeben sich wegen der geringen technischen Limitationen und der besonders authentischen und realistischen Haptiksimulation besonders vielfältige Einsatzmöglichkeiten. Durch die Implementierung des Mikrochips würden für zahlreiche Situationen virtuell-haptische Interaktionsmöglichkeiten mit computerbasierten Systemen ermöglicht werden. Jegliche Bereiche der VR könnten damit hap-

<sup>125</sup> O'DOHERTY, 2011

<sup>126</sup> O'DOHERTY, 2011

tisch erlebbar gemacht werden. Besonders interessant ist diese Methode wiederum im medizinischen Bereich, etwa als Weiterentwicklung von Prothesen. Man könnte Menschen, die auf Arm-, Hand- oder Beinprothesen angewiesen sind, das haptische Gefühl in den künstlichen Gliedmaßen zurückgeben, sodass die Bedienung dieser einer natürlichen ähneln würde. Auch Grunwald hat den Nutzen Haptik-simulierender Technologien für diesen Bereich erkannt<sup>127</sup>:

„Ein relativ großes Anwendungsgebiet der Haptikforschung hat sich in den letzten Jahren innerhalb der Rehabilitation, insbesondere der Arm- und Beinprothetik entwickelt. Ziel solcher Entwicklungen ist es, z.B. mittels geeigneter elektrischer Reizung der Stumpfregionen und der Analyse der Muskelpotentialen der jeweiligen Gliedmaße, eine effektive Steuerung elektromechanischer Prothesen durch den Träger zu erreichen. Auf diese Weise soll es dem Prothesenträger möglich sein, sensorische Qualitäten des Tastsinnes auch mittels einer Prothese wahrnehmen zu können.“

Mit den vielen Vorteilen und Innovationen, die diese Technologie bietet, ergeben sich allerdings auch besondere Risiken und Schwierigkeiten bei der Anwendung. Durch den permanenten Eingriff in den menschlichen Körper, in die Motorik und das Gehirnsystem, sollte der Einsatz jeglicher neuronaler Stimulation besonders aus moralischer und ethischer Sicht diskutiert werden. Auch Langzeitauswirkungen neuronaler Stimulation sollten untersucht werden. Dieser Schritt wird besser erforschbar, sobald eine Übertragung dieses Prinzips auf den Menschen vorgenommen wird. Der Forschungsbedarf auf diesem Gebiet wird das MIT und die Duke University voraussichtlich auch in Zukunft beschäftigen.

Die vorgestellten Entwicklungen zur Erzeugung virtueller Haptik, von elektro-mechanischen Feedback Devices für Force- und Tactile-Feedback-Simulation bis hin zur neuronalen Hirnstimulation, haben bestätigt, dass es viele verschiedene Methoden zur Haptiksimulation gibt, die Vor- und Nachteile bergen. Oberste Maxime ist, dass die Systeme zum Nutzungskontext passen müssen. Dies gilt besonders für Tool-basierte Devices, bei denen die Inter-

---

<sup>127</sup> GRUNWALD, 2009, S.15

aktion mit virtuellen Objekten nur indirekt erfolgen kann. Die haptischen Reize, die elektro-mechanische Devices wie die Ultraschall-Displays erzeugen, ermöglichen zwar eine direkte Interaktion, allerdings gibt es auch hier Optimierungsbedarf bei der Wiedergabe. Diese technischen Limitationen und Kompromisse sind bei der neuronalen Hirnstimulation zur Haptiksimulation zwar minimiert, allerdings ist dieses Forschungsfeld bei Weitem nicht ausreichend fortgeschritten, um aktuelle Systeme zu ersetzen. Alle Methoden haben die Gemeinsamkeit, dass sie in zahlreichen Szenarien als MM-Schnittstelle, insbesondere in VR und Simulatoren verwendet werden können und bereits teilweise durch Nutzerstudien überprüft wurden.

## 5.4 Zusammenfassung der Anwendungsmöglichkeiten Virtueller Haptik

Bereits bei der Vorstellung der Devices wurden mögliche Anwendungskontexte erwähnt. An dieser Stelle sollen die möglichen Anwendungsszenarien virtueller Haptik im Allgemeinen, unabhängig vom Device-Typ zusammengefasst werden.

Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass die Anwendungsmöglichkeiten von Virtual Reality, die in Kapitel 3 Beschrieben wurden, auch auf VR-Systeme mit virtueller Haptik übertragen werden können. Neben dem Gaming-, Entertainment- und Infotainment-Sektor, können sie ebenfalls in jeglichen Branchen eingesetzt werden, in denen es Bedarf für Simulationen gibt, wie beispielsweise der Flug- und Raumfahrtbranche, Automobilindustrie, Militär, der Produktionsplanung und Prototyping sowie in der Architektur, der Landschaftsplanung und der medizinischen und chirurgischen Ausbildung. Srinivasan fasst die Anwendungsgebiete virtueller Haptik in der folgenden Übersicht zusammen:

- “Medicine: surgical simulators for medical training, manipulating micro and macro robots for minimally invasive surgery, remote diagnosis for telemedicine, aids for the disabled
- Entertainment: video games and simulators that enable the user to feel and manipulate virtual solids, fluids, tools and avatars
- Education: giving students the feel of phenomena at nano, macro, or astronomical scales; what-if-scenarios, experiencing complex data sets

- Industry: designer can freely manipulate the mechanical components of an assembly in an immersive environment
- Graphic Arts: virtual art exhibits, concert rooms and museums in which the user can login remotely to play musical instruments and to touch and feel the haptic attributes of the displays, individual or cooperative virtual sculpting across the Internet<sup>128</sup>

Das Thema Teleoperation wird zusätzlich in einer von Grunwalds Arbeiten detaillierter betrachtet. Eine Anwendung virtueller Haptik bei Teleoperationen wird für folgende Bereiche als Möglichkeit betrachtet:

- Anwendung in Kernkraftwerken
- Bei der Erforschung des Meeresbodens mit U-Booten
- Betätigungen im Weltraum
- Minimal invasive Chirurgie<sup>129</sup>

So wird deutlich, dass die Entwicklung von Devices zur Erzeugung virtueller Haptik für viele Branchen und Gebiete nennenswerte Vorteile bietet und dass sie auch an Stellen zum Einsatz kommen kann, an denen man zunächst keinen direkten Zusammenhang mit Computersystemen vermuten würde. Von der Implementierung in umfangreiche VR-Systeme und Simulatoren bis hin zu alltäglicheren Anwendungen, wie zum Generieren eines haptisch-virtuellen Lichtschalters in hygienesensiblen Umgebungen, sind viele Möglichkeiten offen. Auch für den Bereich Smart-Home lassen sich viele Anwendungsszenarien vorstellen. Die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten sind i.a. ein Grund für die verschiedenen Methoden und Gerätetypen zur Haptiksimulation. Die adäquate Anpassung der Geräte an den Nutzungskontext bleibt hierbei besonders relevant.

---

<sup>128</sup> SRINIVASAN, 2014 S.94

<sup>129</sup> Vgl. GRUNWALD 2001

## 5.5 Abschließende Betrachtung Virtueller Haptik für Virtual Reality

Durch die Thematisierung virtueller Haptik in diesem Kapitel – von der Definition, der Betrachtung des Forschungsstandes, der technischen Grundanforderungen und der verschiedenen Arten Haptik-erzeugender Systeme bis hin zur Vorstellung einzelner Entwicklungen und Anwendungsbeispiele sowie bereits durchgeführter Nutzerstudien, wurde das zentrale Thema dieser Arbeit umfassend beleuchtet. Dass es sich bei der Haptikforschung nach wie vor um ein neues Forschungsfeld ohne feste Definitionen und Technologiestandards handelt, erschwert die Untersuchung allerdings. Deshalb soll an dieser Stelle die Abgrenzung virtuell-haptischer Simulation von physikalisch-realer Haptik vorgenommen werden. Außerdem erfolgt eine abschließende Einschätzung virtuell-haptischer Simulationen für den Einsatz in VR-Systemen, wie sie bereits im 4. Kapitel für die Nutzung nicht virtueller, sondern physikalisch- haptischer Interaktionsmöglichkeiten in VR-Systemen eingeleitet wurde. Dazu werden die Vor- und Nachteile dieser Technologie zusammengefasst und bewertet.

Es kann festgestellt werden, dass es sich bei den durch ein System generierten virtuell-haptischen Objekten, obwohl diese vom Nutzer berührt werden können, nicht um TUIs als gegenständliche, „anfassbare“ Benutzerschnittstellen handelt. Im Gegensatz zu physikalisch-haptischen Interfaces, bei denen sich durch Gegenstände und Objekte Steuerungsarten ergeben (e.g. klassische Joysticks, Controller usw.), sind die Objekte mit denen der Nutzerhaptisch interagieren kann, virtuell. Man kann diese Interfaces aber als NUI, also natürliche Nutzerinterfaces betrachten, da die realitätsbasierte, natürliche Interaktion mit dem virtuellen System im Vordergrund steht, nicht etwa ein spielerischer, alternativer Einsatz von Haptik als Steuerungselement. Beispielsweise interagiert der User bei der Nutzung eines Devices wie PHANToM bei einer medizinischen Simulation durch das Endstück des Geräts, welches in der VR-Umgebung als chirurgisches Instrument dargestellt wird, mit einem natürlichen Interface. Bei den toolbasierten Geräten zur taktilen Haptiksimulation über ein stiftähnliches Device verhält es sich ähnlich. Bei der Benutzung eines Ultraschall-Displays stellt das virtuell generierte Objekt selbst das Interface dar und der Nutzer interagiert mit dem System indem er dieses manipulieren kann. Bei der neuronalen Stimulation geht die Kontrolle tatsächlich vom Gehirn des Nutzers aus, das Interface würde ebenfalls das virtuelle Objekt selbst. So könnte der Nutzer etwa einen virtuellen Ball werfen, um damit bestimmte Aktionen des Systems zu verursachen. So wird eine natürliche, den physikalischen

Gesetzmäßigkeiten der Realität entsprechende MMI in VR-Systemen durch ein derartiges Devices zur virtuell-haptischen Simulation möglich.

Für die Bewertung Haptik-simulierender Technologien zur Erzeugung virtueller Haptik in der MMI, speziell für VR-Systeme, ist festzuhalten, dass die bereits gezogenen Schlüsse zur Sinnhaftigkeit, systemischen Notwendigkeit und positiven Zukunftsaussicht der Tastsinnesansprache im Allgemeinen für eine optimierte MMI basierend auf physikalisch-haptischen Interfaces aus dem Kapitel 4.5 übernommen werden können, da die selben Anforderungen auch für virtuell-haptische Interaktionsmöglichkeiten gelten. Es wurde bereits festgestellt, dass eine Kombination aus visuellen, auditiven und haptischen Interaktionsmöglichkeiten besonders empfehlenswert erscheint, da diese die Ansprüche der Multimodalität und der interaktiven, natürlich-körperlichen bzw. gestengenorientierten Steuerung erfüllen kann. Für die Gruppe der physikalisch-haptischen Interfaces wurde dies in Versuchen, i.a. in der Untersuchung zur Auswirkung der Simulation von Wind als haptisches Empfinden in Cave-Systemen, auch bestätigt. Durch die Tatsache, dass der Seh- und Gehörsinn in der digitalen Welt prioritär stimuliert werden und man bereits von einer Überreizung dieser Sinne sprechen muss, in Kombination damit, dass der hohe technologischen Stand in der visuellen und auditiven Realitätssimulation kaum weitere Steigerungen zulässt, tritt die Ansprache des Tastsinnes als fähiger Hoffnungsträger in Erscheinung.

Speziell bezogen auf virtuell-haptische MM-Schnittstellen sollte herausgestellt werden, dass diese die Grundprinzipien der Multimodalität und natürlichen Interaktivität für VR-Systeme erfüllen. Ähnlich wie bei der Eignungsuntersuchung physikalischer Haptiksysteme wie der Windsimulation im Cave-System, konnten auch beim Einsatz virtueller Haptik, beispielsweise bei der Untersuchung der virtuellen Endoskopie, durch diese Grundprinzipien eine Leistungssteigerung der Teilnehmer und ein positiver Einfluss auf die Wahrnehmung festgestellt werden. Während diese Grundprinzipien bei beiden Systemen etwa gleich gut erfüllt werden, wird beim zweiten Punkt, der natürlichen Interaktivität, deutlich, dass die virtuelle Haptik dem Konzept physikalisch-haptischer Interfaces überlegen ist. Virtuell-haptische Interfaces und ihre Devices werden als NUIs entwickelt und sollen einer natürlichen, körperlich-gestengesteuerten Nutzung dienen. Bei physikalisch-haptischen Interfaces muss dies nicht unbedingt der Fall sein - viele lassen sich eher als TUI einordnen, bei dem die alternative, spielerische Ansprache des Tastsinns im Vordergrund steht. Zusätzlich bieten virtuell-haptische Interfaces den Vorteil, dass sie in VR-Umgebungen das Prinzip der

Virtualität konsequent umsetzen, da Haptik-simulierende Devices ebenfalls virtuelle Objekte generieren. Die Virtualität der Umgebung bleibt deshalb intakt, obwohl sie um die Ansprache des Tastsinnes ergänzt wird. Als letzter Vorteil virtueller Haptik kann die Tatsache genannt werden, dass durch sie Objekte generiert werden können, die als physikalisch-reales Objekt nicht in der jeweiligen VR-Umgebung verwendbar oder nachbildbar sind. So wäre beispielsweise eine Simulationsumgebung für den medizinischen Bereich kaum durch physikalisch-haptische Nachbildungen möglich. Gleiches gilt für eine realistische, physische Nachbildung besonderer Ausstellungsstücke und Relikte in einem Museum, die im Zweifel viel zu aufwendig und kostspielig wäre. Auch im Produktdesign und Prototyping haben virtuell-haptische Prototypen und Entwürfe den Vorteil, dass sie den Entwicklern einen umfassenden Eindruck vom Entwurf geben, bevor dieser produziert werden muss.

Diese vier Vorteile virtueller Haptik,

1. die Multimodalität und damit verbundene Leistungssteigerung des Nutzers,
2. die als NUI ermöglichte natürliche Interaktion,
3. das Prinzip der konsequenten Virtualität trotz der Ansprache des Tastsinns und
4. die haptisch-virtuelle Digitalisierung von Objekten, die real nicht dargestellt oder nachgebildet werden könnten,

sprechen für die Nutzung dieser Technologie in der VR.

Die Auseinandersetzung mit diesem Thema hat allerdings auch gezeigt, dass es durchaus Schwierigkeiten bei der Entwicklung und Risiken in der Nutzung Haptik-simulierender Devices gibt. Es wurde deutlich, dass besonders in der Entwicklung elektro-mechanischer Devices hinsichtlich der Haptiksimulation Kompromisse gemacht werden müssen: Durch Tool-basierte Ansätze wird die Simulation auf Situationen beschränkt in denen die Benutzung des Tools authentisch ist, bei Devices zur Direktmanipulation muss der generierte virtuell-haptische Reiz dringend optimiert werden, um eine sinnvolle Anwendbarkeit gewährleisten zu können. Die technischen Anforderungen, die an ein solches System gestellt werden, sind recht hoch und komplex. Somit ergeben sich Limitationen, etwa durch die erforderliche hohe Rechenleistung, die erst mit weiterem Fortschritt der Technologie erfüllt werden können. Bei der neuronalen Hirnstimulation zur Haptiksimulation können einige Probleme zwar

gelöst werden, Fragen zur tatsächlichen Leistung solcher Systeme, medizinischen Langzeitfolgen und ethischen Grundsatzproblemen können aber weiterhin nicht beantwortet werden und unterminieren so die Brauchbarkeit dieser Technologie auf heutigem Stande. Generell bleibt festzuhalten, dass selbst die Risiken und Auswirkungen einer zu realen VR bedacht und diskutiert werden müssen. Hier wird deutlich, dass die Haptikforschung sich auf diesem Gebiet am erst an ihrem Anfang befindet. Da es sich hierbei aber durchweg um Hemmnisse handelt, die durch weitere Fortschritte ausgeräumt werden können, kann aus der Gegenüberstellung der Vorteile und (temporären) Schwierigkeiten virtueller Haptik gefolgert werden, dass der Einsatz Haptik-simulierender Systeme als MMI in der VR aus wissenschaftlicher Sicht zukunftsweisendes Potential birgt und gefördert werden sollte.

## 6 Konklusion

Diese Arbeit diente der Analyse des Potenzials Haptik-simulierender Systeme in der Mensch-Maschine-Interaktion, insbesondere in Virtual-Reality Umgebungen. Konkret sollte die Hypothese überprüft werden, **ob die Ansprache des Tastsinns durch die Erzeugung virtueller Haptik in realitätssimulierenden Systemen systemisch notwendig und sinnvoll ist**. Die systemische Notwendigkeit tritt dann ein, wenn bisher genutzte Wahrnehmungskanäle überreizt sind oder eine Authentizitätssteigerung der VR durch authentischere Darstellungen nicht mehr möglich ist. Die Sinnhaftigkeit ist gegeben, sobald mittels virtueller Haptik positive Effekte auf die Wahrnehmung, Interaktion und Informationsaufnahme des Nutzers erzeugt werden können. Eine Feststellung des Potenzials dieser Technologie für eine zukunftsweisende und innovative MMI sollte ebenfalls überprüft werden, falls durch sie eine Optimierung herkömmlicher MM-Systeme erfolgen würde.

Um die Hypothese zu überprüfen, wurden zunächst aus wahrnehmungstheoretischer Sicht die **2. Grundlagen des Tastsinns** erläutert, um die Ansprüche an eine optimale MMI auf dem Hintergrund der menschlichen Wahrnehmung abzuleiten. Dabei konnte festgestellt werden, dass:

- der Tastsinn im menschlichen Wahrnehmungssystem einen besonders hohen Stellenwert hat, da mit ihm die Selbstwahrnehmung des Menschen und seiner Körperlichkeit intern und in Abgrenzung zu seiner Umwelt einhergeht
- und die Ansprache des Tastsinns in Kombination mit audio-visuellen Reizen zu einer besonders intensiven Wahrnehmung und Aufmerksamkeit in der Umwelt führt,
- dennoch historisch gesehen eine starke Vernachlässigung und Unterschätzung des Tastsinnes in der Wissenschaft aufgezeigt werden kann und deshalb nach wie vor Forschungs- und Aufholbedarf in der Haptikforschung besteht.

So konnte die Ansprache des Tastsinns allgemein in der Interaktion des Menschen mit seiner realen Umwelt, ganz unabhängig von Maschinen- oder Computersystemen, als besonders wichtig festgestellt werden.

Danach wurde in **3. Grundlagen der Mensch-Maschine-Interaktion** das Basiswissen über die MMI vermittelt, um aus IT-konzeptioneller Perspektive die Anforderungen an ein gelungenes Mensch-Maschine-System ableiten zu können. So sollte die Ansprache des Tastsinns in der Interaktion des Menschen mit seiner digitalen Umwelt im Allgemeinen beurteilt werden können. Es konnte festgehalten werden, dass:

- für eine gelungene MMI eine möglichst multimodale Ansprache des Nutzers nötig ist, also viele bzw. alle Sinne angesprochen werden sollten,
- die Schnittstellen, über die der Nutzer mit dem System in Kontakt tritt und interagiert möglichst intuitiv, natürlich, einfach und ohne Lernaufwand zu bedienen sein sollten und
- dass haptische Interfaces diese Ansprüche erfüllen können,
- dennoch in den meisten MMS hauptsächlich visuelle bzw. visuell-akustische Interaktionsmöglichkeiten und Informationsdarstellungen geboten werden.

So konnte die Relevanz der Tastsinnesansprache nicht nur bei der Interaktion der realen Umwelt, sondern auch mit der digitalen Welt herausgearbeitet werden. Diese folgt dem Grundprinzip der Multimodalität und ermöglicht so die Entwicklung neuer Schnittstellenarten, die eine intuitive Interaktion zulassen.

In **4. Virtual- und Augmented Reality in der MMI** wurden VR-Systeme detaillierter thematisiert, um die vorliegende Eignungsuntersuchung auf VR und AR Computer-Systeme einzugrenzen und sich dem zentralen Thema der vorliegenden Arbeit zu nähern. Dabei wurde klar, dass:

- besonders in VR-Systemen der Aspekt der Multimodalität für eine authentische Realitätssimulation von sehr hoher Bedeutung ist,
- die gebotenen Schnittstellen besonders intuitiv, natürlich und den physikalischen Gesetzmäßigkeiten der realen Welt entsprechend benutzbar sein sollten( im Idealfall durch körper- und gestengesteuerte Interaktion),
- auch hier eine historische Vernachlässigung des Tastsinnes nachvollzogen werden kann. Während die meisten VR-Systeme audio-visuell beinahe auf ihrem maxima-

len Niveau angekommen zu sein scheinen, wird der Tastsinn nach wie vor kaum angesprochen.

Ein ergänzender Einsatz haptischer Interaktionselemente könnte als Lösung dieses Problems angeboten werden, da so das Grundprinzip der Multimodalität erfüllt und eine haptische, natürliche Direktmanipulation des Systems durch den Nutzer möglich werden würde. Die Einbindung des Tastsinns und die Entwicklung haptischer Interaktionsmöglichkeiten konnten entsprechend bereits in diesem Kontext als sinnvoll und systemisch notwendig eingeschätzt werden. Haptische Nutzerschnittstellen erscheinen dadurch zukunftsweisend für eine Weiterentwicklung und Optimierung von Mensch-Maschine-Systemen im Allgemeinen.

Abschließend wurde in **5. Virtuelle Haptik** die Technologie zur Erzeugung virtuell-haptischer und nicht real-haptischer Interfaces thematisiert, um eine finale Eingrenzung hin zur Beantwortung der Hypothese dieser Arbeit zu erreichen. Nachdem die Eignung real-haptischer Interfaces bereits bestätigt werden konnte, sollte zuletzt die Inklusion virtuell-haptischer Interfaces erfolgen. Es konnte festgestellt werden, dass

- virtuell-haptische Interfaces ebenso den Aspekt der Multimodalität und damit verbundenen Leistungssteigerungen erfüllen,
- als MM-Schnittstelle gegenüber physikalisch-haptischen Interfaces sogar überlegen sind:
  - da sie als NUI (natural user interface) gegenüber physikalisch-haptischen Interfaces, die als TUI (tangible user interface) verstanden werden können, auf dem Prinzip der natürlichen, körperlichen Gestensteuerung fußen und deshalb eine realitätsnähere Interaktion ermöglichen,
  - eine konsequente Virtualität trotz der Ansprache des Tastsinnes durch virtuell-anfassbare Objekte ermöglichen, die, streng genommen, entfällt, sobald in der Virtuellen Realität ein reales Objekt benutzt wird,
  - und die Generierung von Objekten ermöglichen, deren reale Darstellung oder Nachbildung nicht möglich ist,
- allerdings wegen heutiger technischer Limitationen und der Komplexität des Tastsinnes Kompromisse bei der Entwicklung elektro-mechanischer Haptik-Devices

gemacht werden müssen. Außerdem ergeben sich in der Nutzung mancher Technologien Risiken, die aus wissenschaftlicher Sicht nicht abschließend eingeschätzt werden können.

So konnte abschließend anerkannt werden, dass die Ansprache des Tastsinnes durch die Erzeugung virtueller Haptik in VR-Systemen aus wahrnehmungstheoretischer und IT-konzeptioneller Sicht sinnvoll ist, da sie eine Optimierung bestehender und neuer Computersysteme hinsichtlich ihrer Wirkung auf den Nutzer ermöglicht. Die Einbeziehung des menschlichen Tastsinnes erscheint systemisch notwendig, um der audio-visuellen Überreizung und Authentizitätsstagnation entgegenzuwirken. Virtuelle Haptik kann insofern als innovative und zukunftsweisende Technologie für MM-Systeme verstanden werden, durch die die zukünftige Nutzung von Computersystemen grundlegend verändert werden könnte. Die bisherige Vernachlässigung des Tastsinnes in der Kognitionswissenschaft und der praktischen Informatik konnte als ungerechtfertigt eingeschätzt werden. Der besonders hohe Stellenwert und das Potenzial einer gelungenen Tastsinnesansprache für die menschliche Wahrnehmung, besonders in der MMI, konnte in den letzten Kapiteln ausgiebig veranschaulicht werden.

Auf dieser Grundlage kann die Hypothese dieser Arbeit bestätigt und die zentrale Fragestellung, nach der Eignung Haptik-simulierender Systeme zur Generierung optimierter MM-Schnittstellen positiv beantwortet werden.

Es bleibt hervorzuheben, dass die zahlreichen Anwendungsmöglichkeiten virtueller Haptik einschlägige Vorteile für viele Industrien und Branchen birgt. Es wird deutlich, dass sich Haptik-simulierende Technologien nicht nur für die MMI in VR-Systemen eignen, sondern für eine Vielzahl computerbasierter Systeme zum Einsatz kommen können. Es muss deshalb davon ausgegangen werden, dass die Nachfrage nach ihr mit einer zunehmenden öffentlichen Diskussion zu diesem Thema und der Entwicklung optimierter, massentauglicherer Devices steigen wird. Der Bedarf nach neuen, unverbrauchten Kommunikationskanälen, innovativen Anwendungen und Interaktionsmöglichkeiten für die digitale Welt ist groß und kann mit einer Nutzung dieser Technologie bedient werden.

Verglichen mit anderen Sinnesmodalitäten, wird der Forschungsrückstand auf dem Gebiet der Haptik offensichtlich. Weitere Erkenntnisse und damit vermehrte Forschungsbemühungen sind dringend nötig, um die Methoden der Haptiksimulierung zu optimieren. Dennoch konnten bereits im Rahmen dieser Arbeit vielversprechende Devices und Anwendungsmöglichkeiten vorgestellt werden. Damit die Schwierigkeiten, die bislang bei der Entwicklung

entsprechender Technologien auftraten ausgeräumt werden können, sind weitere und detailliertere Erkenntnisse über die Natur des menschlichen Tastsinns notwendig. Je mehr über seine physiologisch-biologische Funktionsweise bekannt ist, desto besser kann er in tatsächliche Anwendungen integriert werden. Deshalb ist eine interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen beiden Wissenschaftsbereichen wünschenswert, damit neue Erkenntnisse über den Tastsinn mit den Fortschritten in der Informationstechnologie kombiniert werden können. Dieses Ansinnen drückt auch Grunwald in einer seiner Arbeiten aus<sup>130</sup>:

„Trotz oder gerade wegen der bisher ergebnisreichen Entwicklungen ist zu erwarten, dass die Ingenieurwissenschaften im Bereich der Robotik und virtuellen Haptik erkennen werden, dass die Entwicklung adäquater technischer Sensor- und Aktorsysteme letztlich eine noch bessere Kenntnis der biologischen Grundlagen des natürlichen Systems erfordert. Insofern müssen Natur-, Technik- und Humanwissenschaften viel stärker als bisher kooperativ miteinander vernetzt werden [...] sodass sich die Haptik als interdisziplinäres Forschungsgebiet der Human- und Technikwissenschaften etabliert.“

Haptik-simulierende Technologien bieten der digitalen Welt die Möglichkeit ihre MMI zumindest in Teilen zu revolutionieren. Sie bergen das Potenzial das menschliche Verständnis der Grenze zwischen Realität und digitaler Welt nachhaltig zu verändern. Die erwartete, zunehmende Relevanz dieser Technologie wird zwangsläufig mit der Weiterentwicklung ihrer wahrnehmungstheoretisch konzipierten Devices einhergehen. Ob der Umgang mit virtueller Haptik in der nächsten Dekade bereits selbstverständlich für Anwender sein wird, bleibt abzuwarten. Die Frage nach der Eignung der Haptik als Medium zwischen Menschen und Systemen, kann schon heute beantwortet werden.

---

<sup>130</sup> GRUNWALD, 2009 S. 16

# Literaturverzeichnis

ACKERMANN et al. 2010

Ackermann, J.; Nocera, C.; Bargh, J. .: *Incidental Haptic Sensations Influence Social Judgments and Decisions*. In: *Science*; 328:1712-1715, 2010

ACOSTA et al. 1999

Acosta, E.; Stephens, B.; Temkin, B.; Krummel, T.; Gorman, P.; Griswold, J.: *Development a Haptic Virtual Environment*, In: 12<sup>th</sup> IEEE Symposium on Computer-Based Medical Systems, Pricedings, Ph.D. Dept. of Computer Science Texas Tech University. Lubbock, 1999

BARFIELD et al. 1995

Barfield, W.; Rosenberg, C.; Lotens, W.; Barfield, W.; Furness, T. (Hrsg.): *Augmented-reality displays*. In: *Virtual environments and advanced interface design*. Oxford University Press, New York, 1995

BENDEL, 2016

Bendel, O.; Springer Gabler Verlag (Hrsg.): *Wirtschaftslexikon*, Stichwort: Mensch-Maschine-Interaktion.2016 [online] – URL: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Definition/mensch-maschine-interaktion.html> (Abgerufen 2016-06-17)

BENTHIEN, 2001

Benthien, C.: *Haut – Literaturgeschichte, Körperbilder, Grenzdiskurse*. Rowohlt's Enzyklopädie, Reinbek, 2001

BERKLEY 2003

Berkley, J.: *Haptic Devices*. Seattle Washington, 2003, [online] – URL: <http://www.hitl.washington.edu/people/TFurness/courses/inde543/READINGS03/BERKLEY/White%20Paper%20-%20Haptic%20Devices.pdf> (Abgerufen 15-10-16)

BULLINGER et al. 1997

Bullinger, H.; Bauer, W.; Braun, M.; Salvendy, G. (Hrsg.): *Virtual environments*. In: *Handbook of human factors and ergonomics*, New York , 1997

BURDEA et al. 1998

Burdea, G.; Patounakis, G.; Popescu, V.: *Virtual Reality Training for the Diagnosis of Prostate Cancer*. 1998 [online] – URL: [https://www.researchgate.net/profile/George\\_Popescu5/publication/2760353\\_Virtual\\_Reality\\_Training\\_for\\_the\\_Diagnosis\\_of\\_Prostate\\_Cancer/links/0c96052fe0d559140e000000.pdf](https://www.researchgate.net/profile/George_Popescu5/publication/2760353_Virtual_Reality_Training_for_the_Diagnosis_of_Prostate_Cancer/links/0c96052fe0d559140e000000.pdf) (Abgerufen 2016-10-20)

CRUZ-NEIRA et al. 1992

Cruz-Neira, C.; Sandin, D.; DeFanti, T.; Keyon, R.; Hart, J.: *The CAVE: audio visual experience automatic virtual environment*. In: *Communications of the ACM* 35 (6): 65–72m 199, 1992

DÖRNER et al. 2013

Dörner, R.; Broll, W.; Grimm, P.; Jung, B. (Hrsg.): *Virtual und Augmented Reality*. Springer Verlag, Heidelberg, 2013

FB MENSCH-COMPUTER-INTERAKTION, 2016

FB Mensch-Computer-Interaktion: Was ist Mensch-Computer-Interaktion? 2016 [online] – URL: <http://fb-mci.mensch-und-computer.de/community/thema/> (Abgerufen 2016-06-17)

FREIER, 2009

Feier, M.: *Der Einsatz multisensueller Elemente im Marketing und die Wirkung auf Frauen und Männer*. Grin Verlag, Norderstedt, 2009

FREY, 1896

Frey, M.: *Untersuchungen über die Sinnesfunktionen der menschlichen Haut*. Hierzel. Leipzig, 1896

FRÖHLICH & WACHSMUTH, 2013

Fröhlich, J; Wachsmuth, I.: *Frischer Wind in der CAVE: Realisierung und Evaluation einer multimodalen virtuellen Welt*. In: *Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung*, HNI Verlagsschriftenreihe Band 311: 191-203, Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn, 2013

GEIS, 2007

Geis, T.: (Die neue) DIN EN ISO 9241-110 („Grundsätze der Dialoggestaltung“). 2007 [online] – URL: <http://www.fit-fuer-usability.de/archiv/die-neue-din-en-iso-9241-110-grundsätze-der-dialoggestaltung/> (Abgerufen 2016-10-02)

GESSAT, 2016

Gessat, M.: *Augmented-Reality Apps*. 2016 [online] – URL: <http://www.spiegel.de/netzwelt/apps/pokemon-go-alternativen-das-sind-weitere-augmented-reality-apps-a-1104216.html> (Abgerufen 2016-10-02)

GOOGLE, 2016

Google: *Daydream*. 2016 [online] – URL: [https://vr.google.com/intl/de\\_de/daydream/](https://vr.google.com/intl/de_de/daydream/) (Abgerufen 2016-10-05)

GOOGLE, 2015

Google: *Google Glass*. 2016 [online] – URL: <https://developers.google.com/glass/design/ui> (Abgerufen 2016-10-05)

GRUNWALD, 2001

Grunwald, M.; Beyer, L. (Hrsg.): *Der Bewegte Sinn: Grundlagen und Anwendungen zur haptischen Wahrnehmung*. Birkhäuser, Basel, Boston, Berlin, 2001

GRUNWALD, 2009

Grunwald M: *Der Tastsinn im Griff der Technikwissenschaften? Herausforderungen und Grenzen aktueller Haptikforschung*. 2009 [online] – URL: [http://leibniz-institut.de/archiv/grunwald\\_martin\\_09\\_01\\_09.pdf](http://leibniz-institut.de/archiv/grunwald_martin_09_01_09.pdf) (Abgerufen 2016-06-17)

GRUNWALD, 2016

Grunwald, M.: Haptik-Forschungslabor: Allgemeine Themenstellungen. 2016 [online] – URL: <http://haptiklabor.medizin.uni-leipzig.de/forschung/allgemeine-themenstellung/> (Abgerufen 2016-09-26)

GREFKES & FINK, 2009

Grefkes, C.; Fink, G.: *Somatosensorisches System in Funktionelle MRT in Psychiatrie und Neurologie*. Springer Medizin Verlag, Heidelberg 2009

HARTMANN, 2014

Hartmann, O.; Haupt, S.: *Touch!: der Haptik-Effekt im multisensorischen Marketing*. Haufe-Lexware, Freiburg, München, 2014

HEINECKE, 2012

Heinecke, A.: *Mensch-Computer-Interaktion: Basiswissen für Entwickler und Gestalter*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2012

JONES & STARTER, 2008

Jones, L.; Starter, N.: *Tactile Displays: Guidance for Their Design and Application 2008*. In: Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society February 2008 vol. 50 no. 190-111, 2008

JÜTTE, 2000

Jütte, R.: *Geschichte der Sinne: von der Antike bis zum Cyberspace*. C.H. Beck, München, 2000

KATZ, 1925

Katz, D.: *Der Aufbau der Tastwelt*. Verlag von Johann Ambrosius Barth, Leipzig, 1925

KERN 2009

Kern, T.: *Entwicklung Haptischer Geräte*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg 2009

KOLLE, 2016

Kolle, M.: Tangible User Interfaces – Ein kurzer Überblick über Forschungsfeld und Literatur. 2016 [online] – URL: [https://www.medien.ifi.lmu.de/lehre/ws1011/mmi2/mmi2\\_uebungsblatt1\\_loesung\\_koelle.pdf](https://www.medien.ifi.lmu.de/lehre/ws1011/mmi2/mmi2_uebungsblatt1_loesung_koelle.pdf)

KRÜGER et al. 2008

Krüger, A.; Stampe, K.; Irrgang, S.; Richter, I.; Strauß, G.; Preim, B.: Eingabegeräte und Interaktionstechniken für die virtuelle Endoskopie. 2008 [online] – URL: [http://www.isg.cs.uni-magdeburg.de/visualisierung/wiki/data/media/files/endoscopy/krueger\\_2008\\_mc.pdf](http://www.isg.cs.uni-magdeburg.de/visualisierung/wiki/data/media/files/endoscopy/krueger_2008_mc.pdf) (Abgerufen 2016-10-20)

KUCHENBECKER et al. 2011

Kuchenbecker, K.; Romano, J.; McMahan, W.: *Haptography: Capturing and Recreating the Rich Feel of Real Surfaces*. In: 14th International Symposium on Robotics Research. Lucerne, August 31 - September 3, 2009. DOI: 10.1007/978-3-642-19457-3\_15, Schweiz, 2011

- KUCHENBECKER, 2012  
Kuchenbecker, K.: Haptics. 2012 [online] – URL: <http://haptics.seas.upenn.edu/> (Abgerufen 2014-02-27)
- KUCHENBECKER, 2015  
Kuchenbecker, K.: Advances in Haptics Research. 2015 [online] – URL: <http://circuitcellar.com/community/interviews/advances-in-haptics-research/> (Abgerufen 2014-02-27)
- KUHN, 1976  
Kuhn, T.: *Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen*. Suhrkamp, Frankfurt am Main, 1976
- LASSWELL, 1948  
Lasswell, H.: *The Structure and Function of Communication in Society*. In: Bryson, Lyman (Hrsg.) *The Communication of Ideas. A Series of Addresses*. New York, 1948
- LUCKHARDT, 1999  
Luckhardt, H.: Multimedia – ein Begriff und seine (Er-)Klärung. 1999, [online] – URL: <http://is.uni-sb.de/studium/handbuch/multimedia> (Abgerufen 2014-02-27)
- MUSIC TECHNOLOGY GROUP, 2003  
Music Technology Group: Universität Pompeu Fabra, Barcelona. 2003 [online] – URL: <http://mtg.upf.edu/project/reactable> (Abgerufen 2016-10-03)
- OCULUS VR, 2016  
Oculus VR: Next-generation virtual reality. 2016 [online] – URL: <https://www3.oculus.com/en-us/rift/> (Abgerufen 2016-10-03)
- O'DOHERTY, 2011  
O'Doherty, J.; Lebedev, M.; Ifft, P.; Zhuang, K.; Shokur, S.; Bleuler, H.; Nicoletis, M.: Active tactile exploration using a brain-machine-interface. In: *Nature advance online publication*, 2011 [online] – URL: <http://dx.doi.org/10.1038/nature10489> (Abgerufen 2016-10-24)
- SALISBURY & SRINIVASAN 1997  
Salisbury, J.; Srinivasan, M.: Phantom-Based Haptic Interaction with Virtual Objects. 1997 [online] – URL: [http://www.dentsable.com/documents/documents/ieee\\_Sept97.pdf](http://www.dentsable.com/documents/documents/ieee_Sept97.pdf) (Abgerufen 2016-19-10)
- SENSABLE, 2016  
Sensible: Phantom Premium Model Haptic Devices. 2016 [online] – URL: <http://www.dentsable.com/haptic-phantom-premium.htm> (Abgerufen 2016-10-19)
- SHINODA, 2014  
Shinoda, H.: Shinoda & Makino Lab. 2014 [online] – URL: <http://www.hapis.k.u-tokyo.ac.jp/?lang=en> (Abgerufen 2016-09-26)
- SHINODA et al. 2008  
Shinoda, H.; Iwamoto, T., Tatzono M., Hoshi T.: Airborne Ultrasound Tactile Display. 2008 [online] – URL: [http://www.hapis.k.u-tokyo.ac.jp/public/hiroyuki\\_shinoda/research/pdf/08SIGGRAPH/08\\_iwamoto.pdf](http://www.hapis.k.u-tokyo.ac.jp/public/hiroyuki_shinoda/research/pdf/08SIGGRAPH/08_iwamoto.pdf) (Abgerufen 2016-10-21)

SCHLOERB, 2005

Schloerb, D.: MIT Touch Lab. 2005 [online] – URL: <http://touchlab.mit.edu/index.html> (Abgerufen 2016-09-26)

SCHNEIDER, 2010

Schneider, W.: Übersicht über die Grundsätze der Dialoggestaltung nach DIN EN ISO 9241-110. 2010 [online] – URL: [http://www.ergo-online.de/site.aspx?url=html/software/grundlagen\\_der\\_software\\_ergon/grundsätze\\_der\\_dialoggestalt.htm](http://www.ergo-online.de/site.aspx?url=html/software/grundlagen_der_software_ergon/grundsätze_der_dialoggestalt.htm) (Abgerufen 2016-10-02)

SMETS et al. 1995

Smets, G.; Stappers, P.; Overbeeke, K.; van der Mast, C.: *Designing in virtual reality: perception-action coupling and affordances*. In: Carr K., England R. (Hrsg.) *Simulated and virtual realities: Elements of perception*. London, 1995

SPENCE & HO, 2008

Spence, C.; Ho, C.: Tactile and Multisensory Spatial Warning Signals for Drivers. In: *EEE Transactions on Haptics* Vol. 1, No.2 July-December 2008 [online] – URL: [http://home.ku.edu.tr/machineshop/public\\_html/papers/SpenceTactileDriver.pdf](http://home.ku.edu.tr/machineshop/public_html/papers/SpenceTactileDriver.pdf)

SRINIVASAN, 2003

Srinivasan, M.: Mind and hand in the Touch Lab. 2003 [online] – URL: [http://www.rle.mit.edu/rleatmit/2003february\\_article04.htm](http://www.rle.mit.edu/rleatmit/2003february_article04.htm) (Abgerufen 2016-09-26)

SRINIVASAN et al., 2006

Srinivasan, M.; Biggs, J.; Liu, G.: Laboratory for Human and Machine Haptics: The Touch Lab. In: *RLE Progress Report 148*, 2006 [online] – URL: <http://www.rle.mit.edu/media/pr148/19.pdf> (Abgerufen 2016-10-10)

SRINIVASAN, 2014

Srinivasan, M.: *Haptic Interfaces*. In: Hale K., Staney K. (Hrsg.) *Handbook of Virtual Environments, Design, Implementation, and Applications*. CRC Press Book, 2014

STEINER, 2009

Steiner, P.: *Sound Branding – Grundlagen der akustischen Markteinführung*. Gabler Verlag, Wiesbaden, 2009

STRERI 2005

Streri, A.: *The development of haptic abilities in very young infants: From perception to cognition*. In: *Infant Behavior & Development*, 2005; Vol. (28):290–304, 2005

TLB, 2016

TLB Technologie-Lizenz-Büro: Neue Erfindung verknüpft Wahrnehmung und Interaktion. 2016 [online] – URL: <http://www.tlb.de/de/presse/pressemitteilungen/spin-offs-und-ausgruendungen/neue-erfindung-verkneuepft-wahrnehmung-und-interaktion.html> (Abgerufen 2016-10-22)

## ULTRAHAPTICS, 2016

Ultrahaptics: About us. 2016 [online] – URL: <http://www.ultrahaptics.com/about/> (Abgerufen: 2016-10-21)

## WANN &amp; MON-WILLIAMS, 1996

Wann, J.; Mon-Williams, M.: *What does virtual reality NEED?: human factors issues in the design of three-dimensional computer environments*. In: International Journal of Human-Computer Studies, 44, 829-847, 1996

## WICKENS &amp; BAKER, 1995

Wickens, C.; Baker, P.: *Cognitive issues in virtual reality*. In: Barfield W., Furness T. (Hrsg.) *Virtual environments and advanced interface design* (pp. 514-541). Oxford University Press, New York, 1995

## WINTERGERST et al. 2011

Wintergerst, G.; Jagodzinski, R.; Giles, P.: *Hap.pen: Sketching Haptic Behaviour*. In: Eibl M., Ritter M. (Hrsg.), überMEDIEN|ÜBERmorgen, Workshop-Proceedings der Tagung Mensch & Computer 2011 (S. 13 - 14). Universitätsverlag, Chemnitz, 2011

## ZYMALKOWSKI, 2010

Zymalkowski, D.: *Mechanorezeptoren der Haut*. 2010, [online] – URL: <https://www.dasgehirn.info/wahrnehmen/fuehlen-koerper/mechanorezeptoren-der-haut/> (Abgerufen 2016-09-26)

# Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Schematische Darstellung verschiedener Tastsinnesrezeptoren in der Haut.....	13
Abb. 2: Aufmerksamkeitssteigerung durch multimodale Sinnesansprache.....	17
Abb. 3: Personifizierte Darstellung des Tastsinnes.....	20
Abb. 4: reactTable als Beispiel für ein Gegenständliches HCI.....	33
Abb. 5: Elemente eines VR/AR-Systems.....	37
Abb. 6: Subjektive & objektive Nutzerpräsenz bei unterschiedlicher Sinnesansprache.....	40
Abb. 7: PHANToM Modelle mit Tool- und Direktmanipulation.....	57
Abb. 8: Versuchsaufbau einer simulierten Endoskopie mit PHANToM im Vergleich.....	60
Abb. 9: Navigation mit PHANToM im Vergleich (hohe Werte = bessere Wertungen).....	61
Abb. 10: Prototyp & Darstellung des Airborne Ultrasound Tactile Displays.....	64
Abb. 11: Ultraschall-Display von Ultrahaptics.....	66
Abb. 12: Einsatzmöglichkeiten des Ultrahaptics-Displays.....	67
Abb. 13: Schematische Darstellung des Haptographie-Prinzips.....	69
Abb. 14: Hap.pen als Haptik-simulierendes, stiftbasiertes Tool.....	72
Abb. 15: Schematischen Darstellung neuronal-haptischer Simulation.....	74

## **Versicherung über Selbstständigkeit**

*Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe.*

*Hamburg, den* \_\_\_\_\_