

**Nutzer- und Aufgabengerechte Gestaltung  
von Cross Reality User Interfaces  
am Beispiel der Entwicklung  
eines prototypischen On-body Interfaces  
für den Einsatz in CAD-Anwendungen  
unter Verwendung von Augmented Reality**

---

vorgelegt von  
**Ravell Heerdegen**

E-Mail | Matrikelnr.  
rh075@hdm-stuttgart.de | 38709

**Masterthesis**  
in Computer Science and Media  
an der Hochschule der Medien Stuttgart  
Wintersemester 2021 | 2022

zur Erlangung des akademischen Grades  
**Master of Science**

Erst-Prüfer/Prüferin: Prof. Dr. Huberta Kritzenberger  
Zweit-Prüfer/Prüferin: Prof. Dr.-Ing. Dieter Spath  
Betriebliche Betreuung: Benjamin Wingert M.Sc.

Eingereicht am 02.11.2021

## Zusammenfassung

Science-Fiction-Filme wie Iron-Man faszinieren zahlreiche Menschen weltweit. Holografische, schwebende Objekte, Computer-Funktionen die durch Blickkontakt und Sprachsteuerung in einem Helm oder durch Gesten gesteuert werden, sowie Interaktionen auf den Armen und Händen. Die genannten surreal klingenden Optionen sind jedoch keine reine Fiktion mehr, sondern zum Teil Realität in Branchen wie Videospiele, Bildung und Wirtschaft geworden. Selbst in Disziplinen, die im Hintergrund arbeiten, wie dem Computer-aided design, sind die genannten Verfahren real. Technologien wie Virtual und Augmented Reality helfen bspw. Produktentwicklern dabei, 3D-Modelle von Produkten zu erstellen, die in einem dreidimensionalen Raum begutachtet und zusammengebaut werden können. Bei Augmented Reality können z.B. Projektoren und Sensoren, Symbole und Texte auf den menschlichen Körper projizieren und Interaktionen erfassen. Jedoch kommt dabei konservative und komplexe Software zum Einsatz, die Schwierigkeiten wie kompliziert auszuführende Befehle oder unübersichtliche, hierarchische Menüs beinhalten. Dadurch wird der Produktentstehungsprozess negativ beeinflusst und auch persönliche Faktoren wie Motivation und Stimulation sinken. In dieser Arbeit wurde ein On-body Interface mit Augmented Reality für den Computer-aided design-Einsatz entwickelt. Das Ziel dabei war herauszufinden, wie ein On-body Interface aussehen könnte, das bezogen auf Computer-aided design, die Komplexitätsprobleme von Computer-aided design-Anwendungen behandeln und als sinnvolle Erweiterung dienen könnte, sowie welche Faktoren dafür entscheidend sind. Das entwickelte System wurde durch eine Evaluation mit 14 Probanden anhand standardisierter Verfahren wie dem AttrakDiff- und dem SAM-Fragebogen zur Feststellung von empfundener User Experience im Vergleich zu einem herkömmlichen Maus und Tastatur-Vorgehen untersucht und diskutiert. Das Ergebnis der Evaluation zeigt, dass ein generelles Interesse und eine hohe Motivation für eine Arbeit mit einem On-body Interface für den Einsatz in Computer-aided design gegenüber Maus und Tastatur-Vorgehen vorhanden ist. Das On-body Interface wurde durch die Nähe und den Einsatz am eigenen Körper zusätzlich als stimulierend und intuitiv empfunden.

# **Abstract**

Science-fiction movies like iron man are fascinating people worldwide. Holographic, floating objects, computer-functions controlled by eye-contact and speech recognition in a helmet or through gestures, as well as interactions on arms and hands. The named unreal sounding options are no longer pure fiction, but partially reality in fields like education, video games and economy. Even in disciplines, working in the background, like computer-aided design, the called procedures are real. For example technologies like virtual or augmented reality help product developers to create and examine 3d-models of products and even do build processes. With augmented reality for instance, projectors and sensors are used to project symbols and text onto the human body and track interactions. However, conservative and complex software involves issues like complicated commands or confusing, hierarchical menues, which influence the production creation process negatively and even reduces personal factors like motivation or stimulation. In this thesis, an augmented reality on-body interface was developed. The goal was to figure out, how an on-body interface for solving problems of computer-aided design applications and extending computer-aided design applications could look like, as well as which factors are decisive. The developed system got evaluated by 14 subjects through an evaluation with standardized methods like the AttrakDiff- and SAM-questionnaires to identify user experience compared to a mouse and keyboard approach. The system got discussed afterwards with the help of the results of the evaluation. The result shows a general interest and a high motivation working with an on-body interface in computer-aided design compared to just mouse and keyboard. By keeping closeness to and using the own body, subjects even felt stimulated and rated the system as intuitive.

# Danksagung

## Betreuer und Prüfer

---

Zunächst möchte ich mich ganz herzlich bei Frau Prof. Dr. Kritzenberger und Herrn Prof. Dr. Spath für die Zusage als Erstbetreuerin und Erstprüferin respektive Zweitbetreuer und Zweitprüfer bedanken, wodurch diese Arbeit erst ermöglicht wurde. Danke für eine entspannte und dennoch professionelle Kooperation, sowie informative und wertvolle Gespräche. Nicht geringfügiger möchte ich mich bei meiner betrieblichen Betreuung Herrn Wingert sowie bei Herrn Dixken für eine hingebungsvolle und engagierte Zusammenarbeit bedanken.

## Familie

---

Meiner Familie möchte ich von ganzem Herzen für alle Zeit und Mühen die für mich investiert wurden danken. Für all die schönen Erinnerungen während der Anfertigung dieser Arbeit sowie die stärkenden Worte und einen erstklassigen Support bei Tag und bei Nacht. Vor allem durch Euch war es mir möglich, erfolgreich voranzuschreiten.

## Freunde

---

Auch meinen Freunden und Bekannten danke ich für viele unterstützende Worte und Taten wenn die Arbeit schwer fiel. Von den aufmunternden Abenden zusammen, konnte ich neue Kraft für die kommenden Tage schöpfen.

## Probanden

---

Allen Probanden danke ich für die Teilnahme an der Evaluation. Danke für die ehrlichen Erfahrungen, sowie die investierte und schöne Zeit.

## **Verzichtserklärung**

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird in dieser Arbeit die Sprachform des generischen Maskulinum angewendet. Es wird an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die ausschließliche Verwendung der männlichen Form unabhängig der Geschlechteridentität verstanden werden soll.

## Ehrenwörtliche Erklärung

„Hiermit versichere ich, Ravell Heerdegen, ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Masterarbeit mit dem Titel: ‘Nutzer- und Aufgabengerechte Gestaltung von Cross Reality User Interfaces am Beispiel der Entwicklung eines prototypischen On-body Interfaces für den Einsatz in CAD-Anwendungen unter Verwendung von Augmented Reality‘ selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Die Stellen der Arbeit, die dem Wortlaut oder dem Sinn nach anderen Werken entnommen wurden, sind in jedem Fall unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht. Die Arbeit ist noch nicht veröffentlicht oder in anderer Form als Prüfungsleistung vorgelegt worden.“

Ich habe die Bedeutung der ehrenwörtlichen Versicherung und die prüfungsrechtlichen Folgen (§ 26 Abs. 2 Bachelor-SPO (6 Semester), § 24 Abs. 2 Bachelor-SPO (7 Semester), § 23 Abs. 2 Master-SPO (3 Semester) bzw. § 19 Abs. 2 Master-SPO (4 Semester und berufsbegleitend) der HdM) einer unrichtigen oder unvollständigen ehrenwörtlichen Versicherung zur Kenntnis genommen.“

Sigmaringen, 02.11.2021

Ort, Datum



Unterschrift

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>1</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>3</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>4</b>
1.1 Kontext und Motivation . . . . .	4
1.2 Ziele der Arbeit . . . . .	6
1.3 Struktur der Arbeit . . . . .	7
<b>2 Grundlagen</b>	<b>8</b>
2.1 Mensch-Computer-Interaktion . . . . .	8
2.1.1 Definition . . . . .	8
2.1.2 Reality-Virtuality Kontinuum . . . . .	9
2.1.3 Ergonomie . . . . .	17
2.1.4 Usability . . . . .	19
2.1.5 User Experience . . . . .	21
2.1.6 Feedback . . . . .	23
2.2 User Interfaces . . . . .	24
2.2.1 Grafische User Interfaces . . . . .	24
2.2.2 3D User Interfaces . . . . .	24
2.2.3 On-body User Interfaces . . . . .	25
2.2.4 Feedback für On-body User Interfaces . . . . .	27
2.3 Produktentwicklung . . . . .	29
2.3.1 Definition . . . . .	29
2.3.2 Produktlebenszyklus . . . . .	30
2.3.3 Produktentstehungsprozess . . . . .	30
2.3.4 Computer-aided Everything . . . . .	31
2.3.5 Computer-aided Design . . . . .	32
2.3.6 Produktentwickler . . . . .	35
2.3.7 Problematiken . . . . .	41
2.4 Verwandte Arbeiten . . . . .	44
2.4.1 Active On-body User Interfaces . . . . .	44
2.4.2 Passive On-body User Interfaces . . . . .	45
2.4.3 Cross Reality Computer-aided Design User Interfaces . . . . .	47

<b>3 Hauptteil</b>	<b>51</b>
3.1 Hinführung zum Konzept . . . . .	51
3.1.1 Leitsätze und Prinzipien . . . . .	51
3.1.2 Eingrenzung . . . . .	62
3.2 Entwicklung des Prototypen . . . . .	64
3.2.1 Beispieldesign . . . . .	64
3.2.2 Vorgehen Interface-Design . . . . .	67
3.2.3 Konzeption . . . . .	68
3.2.4 Finales Konzept . . . . .	74
3.2.5 Technische Umsetzung . . . . .	75
3.2.6 Herausforderungen und Probleme . . . . .	85
3.2.7 Limitierungen . . . . .	87
3.3 Evaluation . . . . .	88
3.3.1 Testszenario . . . . .	88
3.3.2 Aufbau . . . . .	89
3.3.3 Methode . . . . .	90
3.3.4 Durchführung . . . . .	92
3.3.5 Ergebnisse . . . . .	94
3.3.6 Geltungsbereich . . . . .	106
3.4 Diskussion . . . . .	106
<b>4 Schluss</b>	<b>112</b>
4.1 Fazit . . . . .	112
4.2 Ausblick . . . . .	113
<b>Stichwortverzeichnis</b>	<b>114</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>115</b>

# Abbildungsverzeichnis

1	RV Kontinuum . . . . .	9
2	HTC Vive Hardware für VR Anwendungen . . . . .	11
3	3D-Modellierung in VR . . . . .	12
4	Google's AR-Brille Glass Enterprise Edition 2 . . . . .	12
5	Pokémon Go AR-Anwendung . . . . .	14
6	Mixed Reality Venn-Diagramm . . . . .	14
7	Microsoft's HoloLens 2 . . . . .	15
8	Relation zwischen AR, MR, VR und XR . . . . .	16
9	Stark (links) und schwach (rechts) ermüdende Gestenposition . . . . .	18
10	Ofen mit nicht intuitiver Bedienung . . . . .	22
11	Produktlebenszyklus . . . . .	30
12	Ivan Sutherland's SKETCHPAD . . . . .	33
13	Solidworks 3D CAD-Anwendung . . . . .	34
14	3D Maus SpaceMouse von 3dconnexion . . . . .	40
15	SixthSense System . . . . .	44
16	Verwendung des OmniTouch Systems . . . . .	45
17	PalmRC System . . . . .	46
18	Einsatzmöglichkeiten des LightSpace Systems . . . . .	46
19	VRSmart CAD System . . . . .	48
20	Verwendung des DualCAD Systems . . . . .	49
21	CAVE System für CAD-Einsatz . . . . .	49
22	Einsatz des MR-CAD Systems . . . . .	50
23	Korrelation zwischen Dauer und Position bezogen auf Arm-Ermüdung	52
24	Muskelmüdigkeit begünstigende Arbeitshaltung am Schreibtisch . . .	53
25	Ankerpunkte und Funktionsbeispiel auf einer Handfläche . . . . .	59
26	Technische Skizze eines Zahnrads . . . . .	64
27	Aus Skizze angefertigtes Zahnrad . . . . .	67
28	Use-Case Diagramm des Prototypen . . . . .	70
29	Konzeption Variante (1) und (7) . . . . .	71
30	Konzeption der Varianten (2) und (4) . . . . .	72
31	Konzeption der Varianten (3) und (5) . . . . .	73
32	Konzeption der finalen Variante (6) . . . . .	74
33	BenQ W710ST 120Hz Projektor . . . . .	75
34	Ultraleap's Stereo 170 IR Evaluation Kit . . . . .	76
35	Systemdiagramm des Prototypen . . . . .	79
36	Projektor-Kalibrierungsverfahren . . . . .	80

37	Korrektur des Projektor-Frustums . . . . .	81
38	Ein- und Ausblenden der UI-Elemente . . . . .	82
39	Erste Interaktion mit dem Prototypen . . . . .	82
40	Benutzung der Hilfefunktion . . . . .	83
41	Kollisionsflächen der interaktiven UI-Elemente . . . . .	84
42	On-body Interface für Testszenario . . . . .	88
43	Setup des Evaluation-Systems . . . . .	89
44	AttrakDiff Wortpaar-Beispiel . . . . .	90
45	Dimensionen des SAM-Fragebogens . . . . .	91
46	Probandentest des On-body Interface . . . . .	93
47	Rohdaten der Probanden-Zeiterfassung . . . . .	94
48	AttrakDiff Ergebnis: Portfolio-Diagramm . . . . .	102
49	AttrakDiff Ergebnis: Diagramm der Mittelwerte . . . . .	103
50	AttrakDiff Ergebnis: Profil der Wortpaare . . . . .	104

# Tabellenverzeichnis

1	Auszug relevanter CAx-Disziplinen für Produktentwickler . . . . .	31
2	Aufgaben eines Produktentwicklers . . . . .	37
3	Anforderungen an und Fähigkeiten eines Produktentwicklers . . . . .	38
4	Richtlinien zum Aspekt Usability . . . . .	54
5	Richtlinien zum Aspekt User Experience . . . . .	56
6	Richtlinien zum Aspekt Feedback . . . . .	58
7	Richtlinien zum Aspekt User Interface . . . . .	61
8	Richtlinien zum Aspekt Computer-Aided Design . . . . .	62
9	Positive Probanden-Aussagen zum On-body Interface Test . . . . .	96
10	Negative Probanden-Aussagen zum On-body Interface Test . . . . .	97
11	Positive Probanden-Aussagen zum Maus und Tastatur Test . . . . .	98
12	Negative Probanden-Aussagen zum Maus und Tastatur Test . . . . .	99
13	Positives Feedback zum On-body Interface . . . . .	99
14	Negatives Feedback zum On-body Interface . . . . .	100

# 1 Einleitung

## 1.1 Kontext und Motivation

Auf die Hände projizierte oder über Gesten gesteuerte User Interfaces (UIs) sind keine aus Filmen wie Iron-Man bekannte Fiktion mehr. Projekte wie OmniTouch [Harrison und Wilson, 2011] bzw. LightSpace [Wilson und Benko, 2010] verwenden Techniken wie Sensoren und Projektoren, um die Realität durch Digitalität zu erweitern. Technologien wie Virtual Reality (VR) samt am Kopf getragenen Virtual Reality (VR)-Brillen [Riecke et al., 2018] oder Augmented Reality (AR) haben sich in Branchen wie Bildung [Psotka, 1995; Fjeld und Voegtli, 2002], Medien [Kirsner, 2016], Videospiele [LaViola Jr und Marks, 2010; Billinghurst et al., 2014] und Wirtschaft [Xiaoling et al., 2004; Chavan, 2016] etabliert und erfahren zunehmendes Interesse. Augmented Reality (AR) wurde im Besonderen öffentlich bekannt durch das im Jahre 2016 erschienene Pokémon Go für Mobilgeräte [The Pokémon Company, 2016], was vor allem bei Jugendlichen Anklang gefunden hat [Paavilainen et al., 2017].

Virtual Reality (VR) und Augmented Reality (AR) sind beide Technologien, welche unter dem Schlagwort Cross Reality (XR) zusammen kommen. Cross Reality (XR) gilt als Gruppenbegriff und vereint demnach mehrere Technologien wie VR und AR, um dadurch die reale Umgebung zu erweitern bzw. die Erfahrungen mit der realen Welt zu vergrößern [Ziker et al., 2021; Andrade und Bastos, 2019]. Die Erfahrungen können dabei sogar für Bereiche relevant sein, die seit 1960 u.a. für die Branchen Bildung, Medien, Videospiele und Wirtschaft im Hintergrund produzieren. Die Rede ist von Computer-aided design (CAD), worunter das rechnerunterstützte Entwerfen und Konstruieren verstanden wird [Ross, 1956]. Die in Computer-aided design (CAD) geschulten Produktentwickler, arbeiten seit jeher mit Peripheriegeräten wie Maus und Tastatur [Boritz und Booth, 1997], haben jedoch im Verlaufe der Zeit auch Technologien wie 3D-Mäuse zur dreidimensionalen Arbeit integriert [Wang et al., 2011].

Die Technologien VR und AR sind auch in CAD vertreten und finden zunehmend Anwendung für verschiedenste Arbeitsschritte, darunter z.B. Teile in VR begutachten und auseinanderbauen zu können [Wolfartsberger, 2019], oder anhand einer VR-Brille und eines Smartphones 3D-Modelle zu erstellen [Millette und McGuffin, 2017]. Die so aufgebauten User Interfaces (UIs) werden demnach als On-body und 3D User Interfaces bezeichnet, da Geräte zum Einsatz kommen, die am Körper getragen oder in der 3D-Umgebung platziert werden.

Zu den Problematiken in CAD, die bei Aufgaben wie der Erstellung von 2D-Skizzen und 3D-Modellen auftreten, gehören u.a. problematische Software, darunter bspw. kompliziert auszuführende Befehle, sowie komplexe, hierarchische Interfaces unterschiedlicher Programme, die eine effektive und effiziente Entwicklung von Produkten erschweren [Tornincasa et al., 2010; Vajna et al., 2018]. Hinzu kommt, dass von Produktentwicklern entworfene Produkte stets auch Anforderungen im Bereich Ergonomie [LaViola et al., 2004], Usability [Deutsches Institut für Normung e.V., 1999] und User Experience [Richter und Flückiger, 2016] beachten müssen. Eine kontextuelle Ermittlung der Nutzerinformationen wie Bedürfnisse, Aufgaben und Schwierigkeiten ist bspw. wichtig, um ein angemessenes Produkt für eine entsprechende Nutzergruppe zu entwickeln [Richter und Flückiger, 2016]. Kriterien im Punkt User Experience, wie z.B. Ästhetik und wiederum die Funktionalität eines Produktes können sich auf die Erfahrungen, die ein Nutzer vor, während und nach der Benutzung eines Produktes durch einen dynamischen Prozess entwickelt, auswirken [Richter und Flückiger, 2016].

Arbeiten wie [Millette und McGuffin, 2017] und [Wolfartsberger, 2019] haben bereits Schritte unternommen, Aufgaben wie die Modellierung von Teilen in CAD durch alternative Perspektiven darzustellen, jedoch nicht das bisherige, konventionelle Vorgehen über Maus und Tastatur in CAD-Anwendungen durch Technologien wie VR und AR zu vereinfachen und zu erweitern. Mit dieser Arbeit sollen die Probleme der uneinheitlichen Interfaces, komplexen Menüs und komplizierten Befehle angegangen werden, um Produktentwickler dabei zu unterstützen, den Produktentstehungsprozess zu beschleunigen und zu vereinfachen.

## 1.2 Ziele der Arbeit

Ziel und Forschungsmittelpunkt dieser Arbeit ist durch Empirie die Frage zu beantworten, ob sich ein Augmented Reality On-body Interface in CAD zur Behandlung von Problemen mit konventionellen CAD-Anwendungen anbieten würde, wie ein solches Interface aussehen könnte und welche Faktoren dafür und dagegen sprechen. Um die Frage zu beantworten, soll u.a. ein prototypisches System anhand von nutzer- und aufgabengerechten Anforderungen und Prinzipien in Disziplinen wie Usability und User Experience konzipiert und entwickelt werden, die durch Erfahrungen und Erkenntnisse aus der Forschung fundiert sind. Des Weiteren werden Details aus der Produktentwicklung, darunter die Bedürfnisse, Aufgaben und Probleme von Produktentwicklern, in den Entwicklungsprozess des Systems einfließen und dadurch die Funktionalität und Qualität prägen. Eine anschließende empirische Evaluation des entwickelten Prototypen soll durch standardisierte Verfahren, die Vor- und Nachteile eines AR On-body Interface für den Einsatz in CAD-Anwendungen eruieren. Zusätzlich soll herausgefunden werden, welche Aspekte in welchem Umfang dafür entscheidend sind. Das entwickelte Interface soll dabei einer konventionellen Vorgehensweise bestehend aus Maus und Tastatur gegenübergestellt werden.

### **1.3 Struktur der Arbeit**

Im Kapitel “Grundlagen“ wird dafür auf die drei Disziplinen Mensch-Computer-Interaktion, User Interfaces und Produktentwicklung samt Unterthemen anhand wissenschaftlicher und verwandter Arbeiten sowie vorangegangener Forschung eingegangen. Darunter bspw. Definitionen und Fakten über Technologien wie AR und XR, Fachwissen über Ergonomie und den Gorilla-Arm, Usability und User Experience, sowie verschiedene Arten von User Interfaces und tiefere Einblicke in die Prozesse der Produktentwicklung wie CAx und CAD als auch die Bedürfnisse, Aufgaben und Probleme von Produktentwicklern.

Das Kapitel “Hauptteil“ beinhaltet die Hinführung zum Konzept, die Entwicklung und schließlich die Evaluation des entwickelten Prototypen. Dabei werden u.a. die Erkenntnisse aus dem Grundlagen-Kapitel und verwandter Arbeiten verwendet. Leitsätze, Prinzipien und Richtlinien grenzen die Konzeption ein, Hardware, Technologien und Szenarios prägen die Entwicklung und standardisierte Verfahren wie lautes Denken oder anerkannte Fragebögen helfen bei der Durchführung und Auswertung der Evaluation. Anschließend werden die Ergebnisse der Evaluation diskutiert.

Der “Schluss“ umfasst die Unterkapitel Fazit und Ausblick und geht nochmals auf die Ergebnisse dieser Arbeit samt Beantwortung der Forschungsfrage, ob sich ein AR On-body Interface für die Verwendung mit CAD-Anwendungen zur Reduktion von Komplexität eignet, ein. Der Ausblick fasst außerdem das Probanden-Feedback aus der Evaluation für zukünftige Iterationen des Prototypen auf und erläutert Aussichten für die Zukunft von CAD.

#### **Eigene Darstellungen**

Für die gesamte Arbeit gilt dass, sollten Bilder aus dem eigenen Portfolio stammen, der Anhang “(e.D.)“ für “eigene Darstellung“ unter einer Bildbeschreibung verwendet wird.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Mensch-Computer-Interaktion

#### 2.1.1 Definition

Der Begriff Mensch-Computer-Interaktion (MCI) bzw. Human-computer interaction (HCI) wurde in den fünfziger Jahren des 20. Jahrhunderts definiert und umfasst das Gestalten, Erstellen und das Überprüfen von interaktiven Systemen, mit denen Benutzer interagieren können [Mathew et al., 2011; Sinha et al., 2010]. Der Begriff wurde seitdem stetig weiterentwickelt und geprägt. Prinzipiell wird für eine erfolgreiche Human-computer interaction (HCI) der Fokus auf Einfachheit, Benutzerfreundlichkeit respektive Usability und Funktionalität gelegt [Sinha et al., 2010]. Der Punkt Usability wird später in dieser Arbeit ausführlicher behandelt.

Human-computer interaction (HCI) erfährt aufgrund neuer Technologien und Forschungen einen stetigen Wandel und führt unter Umständen auch zu komplexeren Systemen und Interaktionen. U.a. findet HCI durch tragbare Geräte, Gesten- und Sensortechnologien, sowie Touchscreens, Virtual Reality (VR) und Spracherkennung statt [Mathew et al., 2011; Harrison, 2018]. Zu adaptiven Systemen, welche sich an die Bedürfnisse eines Benutzers anpassen, gesellen sich u.a. Kategorien wie Visual HCI und Sensor HCI [Mathew et al., 2011].

Visual HCI beinhaltet Technologien für und Interaktionen wie Bewegungserkennung, Eye-tracking sowie Gesichtserkennung. Sensor HCI bietet die für z.B. Bewegungserkennung notwendigen physischen Sensoren. Zusammen eingesetzt, können Sensoren und visuelle Elemente wie Kameras oder Projektoren jedoch auch weitere Technologien schließlich dazu genutzt werden, multimodale HCI zu erzeugen, respektive eine Mensch-Maschine-Kommunikation über mehrere elektronische Wege herzustellen [Mathew et al., 2011]. Technologien wie Virtual Reality (VR) oder Augmented Reality (AR) erfahren zunehmende Beliebtheit, sowohl im privaten als auch im beruflichen Kontext [Billinghurst et al., 2014]. Dadurch wird auch die Interaktion von bzw. zwischen Mensch und Maschine beeinflusst. Da für diese Arbeit Technologien wie VR und AR einen wesentlichen Faktor bilden, wird im folgenden Abschnitt auf die beiden genannten und zwei weitere Technologien eingegangen.

### 2.1.2 Reality-Virtuality Kontinuum

Das Reality-Virtuality (RV) Continuum von Milgram et al. [1994] untersucht und behandelt das Virtualitätskontinuum und klassifiziert AR sowie VR anhand von Gemeinsamkeiten und Unterschieden zwischen den Technologien, um daraus schließlich eine Definition für Mixed Reality (MR) und einen Zusammenhang zwischen echten und virtuellen Umgebungen darzustellen. Dabei berücksichtigt werden u.a. verschiedene Bildschirmtechnologien und deren Qualität, sowie die räumliche und virtuelle Präsenz eines Benutzers. Das RV Kontinuum ist in Abbildung 1 aufgeführt.

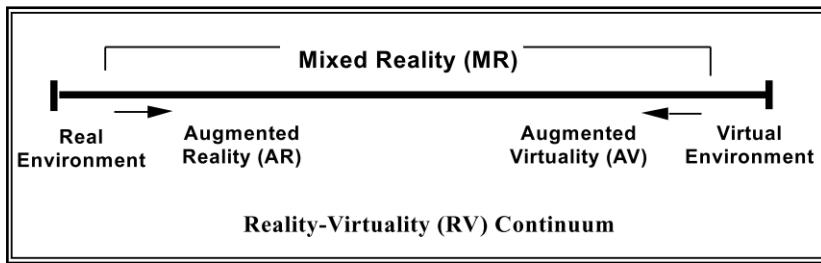


Abbildung 1: RV Kontinuum  
[Milgram et al., 1994]

Der Abbildung zu entnehmen umfasst das RV Kontinuum zwei Extrema links und rechts, sowie einen fließenden Übergang, welcher zwischen den beiden Extrema liegt. Links vom Kontinuum befindet sich die reale Umgebung bzw. die reale Welt mit ausschließlich echten Objekten, die entweder direkt oder z.B. über einen Bildschirm wahrgenommen werden. Das rechte Ende des Kontinuums steht für virtuelle Umgebungen bzw. virtuelle Welten, die ausschließlich aus virtuellen Objekten bestehen und eine vollständige Immersion beinhalten. Zwischen den beiden genannten Extrema bilden AR und Augmented Virtuality (AV) die Kombination aus realen und virtuellen Welten und somit dem Verschmelzen von realen und virtuellen Objekten. Die Darstellung der gemischten Inhalte erfolgt dabei nach Milgram et al. [1994] über ein und den selben Bildschirm. Die Mitte des RV Kontinuums beschreibt den Zustand eines Benutzers, nicht mehr zwischen realer und virtueller Welt unterscheiden zu können. Entscheidend dafür sind die drei Kernaspekte ‘Extent of World Knowledge’, ‘Reproduction Fidelity’ und ‘Extent of Presence Metaphor’, die im nachfolgenden Absatz zusammengefasst beschrieben werden.

### **Extent of World Knowledge**

Mit “Extent of World Knowledge“ ist das Wissen über die Welt und der darin befindlichen Objekte zu verstehen. Sprich, in wie weit ein Mensch versteht, wo er sich befindet. Dabei muss gegebenenfalls das System ein allumfassendes Wissen über die Umgebung sowie einen Menschen selbst besitzen, um eine adäquate Virtualisierung aufzubauen zu können.

### **Reproduction Fidelity**

“Reproduction Fidelity“ bedeutet wie qualitativ die echten und virtuellen Inhalte dargestellt respektive nachgestellt werden. Dabei spielen Faktoren wie Bildschirmqualität, Signalverarbeitung und Rendering-Techniken eine wesentliche Rolle, um ein Gefühl von Echtheit zu erzeugen.

### **Extent of Presence Metaphor**

Der dritte Kernaspekt wird nach Milgram et al. [1994] als “Extent of Presence Metaphor“ bezeichnet. Darunter wird das Gefühl von Präsenz in der dargestellten Szene verstanden. Je nach Anzeigemethode, Bildschirmqualität und Qualität der dargestellten Inhalte kann das Gefühl von Präsenz variieren. Da die Technologien und Praktiken bezogen auf AR, MR und VR einem stetigen Fortschritt unterliegen, greifen die beschriebenen Definitionen nach Milgram im Jahre 2021 zwar prinzipiell, jedoch bedarf es neuerer, fortschrittlicher Untersuchungen und Beschreibungen, um richtige Aussagen über die Technologien treffen zu können. Darum werden in der anknüpfenden Passage die bereits von Milgram et al. [1994] aufgestellten Definitionen neueren Definitionen, bedingt durch den technischen Fortschritt gegenübergestellt, als auch die Technologien AR, MR und VR sowie Cross Reality (XR), welches aus der Kombination von AR, MR und VR entspringt, im Kontext dieser Arbeit beschrieben. Die drei Kernaspekte von Milgram behalten dabei wesentliches Gewicht und fließen implizit in die Beschreibungen mit ein.

### **Virtual Reality**

Nach dem RV Kontinuum ist VR eine rein virtuelle Umgebung, welche eine allumfassende Immersion, sprich ein Echtheit-Gefühl erzeugen soll. Durch Grafik, Audio und Haptik vermitteln virtuelle Welten ein Gefühl von Realität und können dabei z.B. physikalische Gesetze wie Gravitation eliminieren oder ein virtuelles Abbild der Realität erzeugen und erweitern [Milgram et al., 1994; Speicher et al., 2019]. Mitunter können auch Sinne wie Schmecken und Riechen virtuell abgebildet werden, um je nach Kontext die Immersion zu erhöhen [Cater, 1994; Niijima und Ogawa, 2016; Ranasinghe und Do, 2016].

Die Abbildung der echten Welt bzw. die Erzeugung einer virtuellen Welt, in welcher ein Benutzer agieren kann, wird bspw. anhand eines Head-mounted display (Hmd) wie der Oculus Rift realisiert. Zum Einsatz kommen dabei z.B. stereoskopische Bildschirme und Sensoren, um die Kopfbewegungen eines Benutzers zu erfassen. Eine genaue Positionserkennung ist anhand Gyroskopen und Beschleunigungsmessern möglich. Ein anderer Ansatz für Virtualisierung oder auch Augmentierung ist der Einsatz eines Cave Automatic Virtual Environment (CAVE), welches aus vier bis sechs Wänden aus Glas, Bildschirmen oder ähnlichen reflektierenden Oberflächen besteht, um bspw. 3D-Modelle räumlich darzustellen.

## Input- / Outputsysteme

Das erste funktionsfähige Hmd wurde im Jahre 1968 von Ivan Sutherland entwickelt und war bereits in der Lage, u.a. Kopfbewegungen zu erkennen und Modelle zu generieren [Sutherland, 1965]. Bei einem CAVE hingegen werden synchronisierte Projektoren sowie Lautsprecher eingesetzt [Cruz-Neira et al., 1992]. Um mit den virtuellen Welten interagieren zu können, kommen bspw. Handschuhe, Controller, Prothesen oder Sensortechniken zum Einsatz, um Bewegungen und Interaktionen zu erfassen und zu übersetzen [Antonio und Vilas, 2013; Riecke et al., 2018]. Ein Beispiel für ein Hmd sowie für einen VR geeigneten Controller sind die in Abbildung 2 aufgeführten Produkte von HTC.

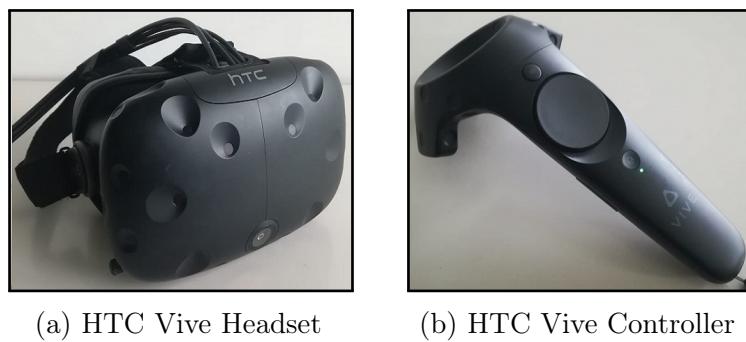


Abbildung 2: HTC Vive Hardware für VR Anwendungen  
(e.D.)

Einsatz finden VR-Anwendungen u.a. in den Bereichen Bildung [Psotka, 1995], Medien [Kirsner, 2016], Videospiele [LaViola Jr und Marks, 2010] und Wirtschaft [Xiaoling et al., 2004]. Auch in der Industrie und der 3D-Modellierung findet VR zunehmend Verwendung [Riecke et al., 2018]. Aufgrund von interaktiver Modelliertechniken im 3D-Raum, dem Ausschalten von Gravitation und weiteren physikalischen Gesetzen sowie dem Einsatz von Rotations-, Selektions- und Manipulationstechniken ist es möglich, in VR Modellierung vorzunehmen,

die an einem Bildschirm mit CAD-Tools so nicht möglich wäre. Der Fortschritt der Technik erlaubt u.a. verschiedene Greif-Methoden durch z.B. Finger- oder Hand-Tracking, was zu einem präzisen Arbeiten beiträgt. Diverse Pointer-Techniken ersetzen die Maus und bedienen u.a. Menüs oder Knöpfe. Ein Beispiel für ein vereinfachtes CAD-Interface in VR sowie die Rotation von Objekten in VR ist Abbildung 3 zu entnehmen.

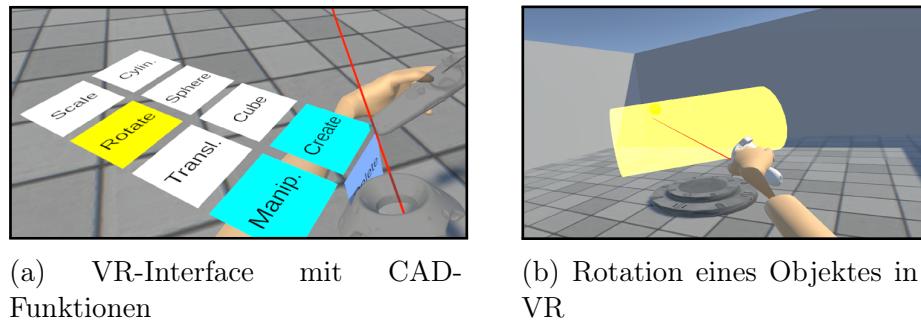


Abbildung 3: 3D-Modellierung in VR  
(e.D.)

## Augmented Reality

Als AR beschreibt das RV Kontinuum die Erweiterung der physikalischen Welt durch digitale Informationen, welche z.B. durch 3D Grafiken räumlich in die echte Welt transportiert werden. Um die digitalen Informationen in der realen Umgebung anzuzeigen, kommen sogenannte durchsichtige Bildschirme, z.B. in Form von Brillen auch Smart Glasses genannt, zum Einsatz, um zusätzlich die räumliche Präsenz zu bewahren [Milgram et al., 1994]. Ein Beispiel einer AR-Brille bzw. Smart Glasses kann Abbildung 4 entnommen werden.



Abbildung 4: Google's AR-Brille Glass Enterprise Edition 2<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup><https://www.google.com/glass/start/> - Zugriff am 13.05.2021

Zur Unterstützung können weiterhin Audio- und Videosignale wie in VR eingesetzt werden. Auch Mobilgeräte wie Smartphones können für AR-Anwendungen verwendet werden. Als bekanntestes Beispiel dient dazu bspw. Pokémon Go, welches die reale Umgebung durch die Smartphone-Kamera und diverse Tracking-Mechanismen erweitert [Speicher et al., 2019].

In Azuma [1997] wird die nach Milgram et al. [1994] aufgestellte Definition für AR durch drei Kriterien erweitert. Demnach ist AR das Verschmelzen von echten und virtuellen Objekten in der realen Umgebung, das Angleichen und Ausrichten von realen und virtuellen Objekten zueinander sowie eine dreidimensionale Interaktion, welche in Echtzeit stattfindet. Auch in AR können Sensortechniken und verschiedene Systeme zur Bewegungserkennung eingesetzt werden, um bspw. die Hände für Gestenerkennung zu erfassen. Projektoren, GPS sowie Helme können für AR-Anwendungen zur Anwendung kommen [Van Krevelen und Poelman, 2010]. Das von Ivan Sutherland 1968 entwickelte Hmd besaß bereits alle für ein AR-System notwendigen Komponenten, darunter durchsichtige Gläser, Rendering-Technologien sowie Interaktionsmöglichkeiten im freien Raum [Sutherland, 1965].

Einer der wesentlichen Unterschiede zwischen VR und AR ist demzufolge, dass AR die reale Welt um virtuelle Elemente erweitert, wohingegen VR die reale Welt durch eine virtuelle Welt ersetzt. Anwendung findet AR bspw. im Unterhaltungsbereich [Billinghurst et al., 2014], in der Medizin [Fuchs et al., 1998], Bildung [Fjeld und Voegtli, 2002], sowie in der Industrie [Chavan, 2016]. Um den Begriff AR sowie die aufgeführten Techniken greifbarer und verständlicher zu machen, wird in folgendem Abschnitt auf die bereits erwähnte AR-Anwendung Pokémon Go eingegangen. Dabei werden die verwendeten Technologien und Praktiken, als auch deren Auswirkungen erläutert.

Pokémon Go erfasst durch GPS und die Kamera eines Smartphones die Umgebung und platziert virtuelle Elemente wie Monster und andere grafische Elemente in die reale Umgebung [Paavilainen et al., 2017]. Pokémon sammeln, Kämpfe bestreiten und den eigenen virtuellen Charakter anzupassen gehören mit zu den Aufgaben eines Pokémon Go Spielers Jedoch auch können sich mehrere Spieler virtuell verabreden und zusammen Aufgaben bewältigen. Die Augmentierung passiert dabei teils in Echtzeit, teils durch vorladende Prozesse, um die Welt schneller aufzubauen bzw. zu erweitern. Abseits von der Augmentierung der Realität, erhält ein Spieler eine virtuelle Ansicht der Umgebung, samt umliegender Straßen, Plätze, besonderer Orte sowie Interface-Elemente wie Knöpfe, verschiedene Regler, Bilder und Texte. Ein personalisierbarer Charakter unterstützen zusätzlich die Immersion in der virtuellen Welt. Die Kombination von AR und digitaler Echtzeitdarstellung in Pokémon Go kann Abbildung 5 entnommen werden.

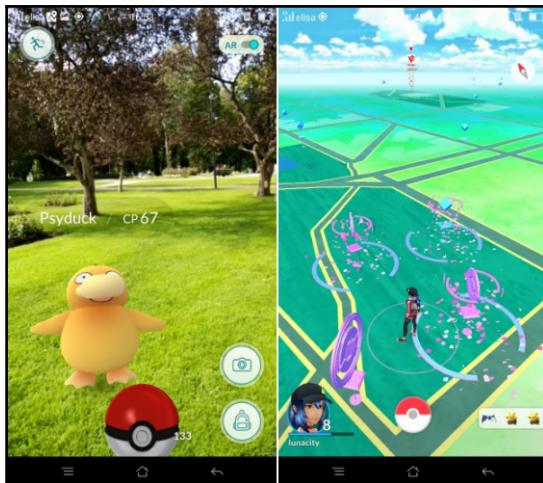


Abbildung 5: Pokémon Go AR-Anwendung  
[Paavilainen et al., 2017]

Der Smartphone-Bildschirm dient somit nicht nur als AR-Werkzeug, sondern auch als Transportmedium zur Darstellung der virtuellen Welt, welche sich in Echtzeit der realen Welt anpasst. Das Sammeln von Pokémon sowie das Kämpfen und Bedienen der Benutzeroberfläche erfordern etablierte Gestiken wie Wischen, Kreisen oder Tippen, als auch kognitive und physische Fähigkeiten wie Zeitmanagement, Feinmotorik und Kenntnisse über Kombinatorik und Abhängigkeiten [Paavilainen et al., 2017].

### Mixed Reality

MR, textuell beschrieben in Abbildung 6, wird nach dem RV Kontinuum einerseits als stärkeres AR, andererseits als Kombination aus VR und AR auf einem einzigen Bildschirm angesehen und befindet sich bezogen auf das Kontinuum je nach Kontext und Implementation zwischen den beiden Extremen [Milgram et al., 1994].

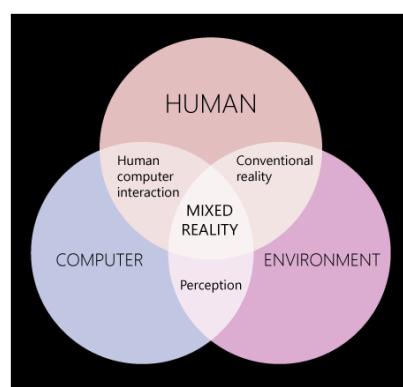


Abbildung 6: Mixed Reality Venn-Diagramm<sup>2</sup>

---

<sup>2</sup><https://docs.microsoft.com/de-de/windows/mixed-reality/discover/mixed-reality>  
- Zugriff am 26.05.2021

Die Darstellung von Inhalten kann dabei bspw. wie bei VR über ein tragbares Gerät wie ein Hmd oder wie bei AR über eine AR- bzw. eine MR-Brille stattfinden. Die HoloLens 2 von Microsoft erweitert die reale Umgebung durch virtuelle Objekte und liefert gleichzeitig virtuelle Elemente unabhängig von der echten Welt. Eine beispielhafte Darstellung der MR-Brille HoloLens 2 von Microsoft ist Abbildung 7 zu entnehmen.



Abbildung 7: Microsoft's HoloLens 2<sup>3</sup>

Inwieweit ein Benutzer eine Telepräsenz, sprich ein Gefühl von virtueller Präsenz empfindet, hängt einerseits von der verwendeten Hardware, z.B. einem Hmd ab, andererseits von der eingesetzten Technik der Hardware, z.B. ob Bilder in Echtzeit und stereoskopisch dargestellt werden.

Demzufolge ist MR eher ein Überbegriff für die Bildschirmtechnologien, die reale und virtuelle Elemente kombiniert darstellen und dabei entweder viel oder wenig Fokus auf virtuelle Präsenz legen, als eine alleinstehende Methode [Milgram et al., 1994]. Nach Speicher et al. [2019] gehört zu MR gegenüber der Definition von Milgram zumindest die reale Umgebung sehen und damit interagieren zu können, als auch das räumliche Empfindungsgefühl bei einem Benutzer zu erhalten. Wie auch in VR und AR können in MR Elemente wie Audiosignale und Sensortechniken zum Einsatz kommen, sowie gewisse Ortungsmechanismen im realen und virtuellen Raum [Çamci et al., 2017].

---

<sup>3</sup><https://www.microsoft.com/de-de/hololens/hardware> - Zugriff am 26.05.2021

## Cross Reality

Cross Reality (XR) oder auch Extended Reality, wird als Kombination aus den zuvor beschriebenen Technologien AR, MR, sowie aus VR und auch virtual worlds (VWs), in denen mehrere Benutzer gleichzeitig interagieren, definiert [Ziker et al., 2021; Andrade und Bastos, 2019]. XR verbindet demnach mehrere Technologien, um dadurch die reale Umgebung zu erweitern bzw. die Erfahrungen mit der realen Welt zu vergrößern. Die Vielfalt der Implementationsmöglichkeiten der drei Technologien AR, MR und VR steigt und wird als Definitionsgrundstein für XR betrachtet.

Wohingegen MR bspw. diverse Grade an Augmentierung der realen Welt sowie gewisse Ausgestaltungen virtueller Welten mit Fokus auf die räumliche Präsenz beschreibt, wird XR als Überbegriff für die Kombination von AR, MR und VR Technologien verstanden, welche dazu dienen, die reale Umgebung zu erweitern und neue Realitäten zu erzeugen [Ziker et al., 2021]. Dabei müssen nicht alle drei Ausrichtungen in einem System vorhanden, sondern der schlichte Einsatz einer der Technologien existent sein. Der Zusammenhang respektive die Vereinigung der Technologien AR, MR und VR zur Bildung des XR-Begriffes wird in Abbildung 8 dargestellt.

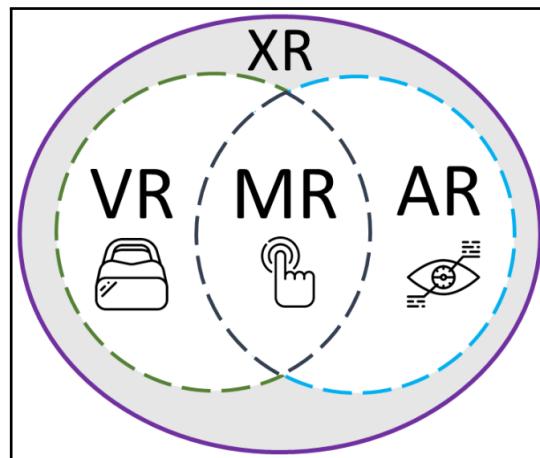


Abbildung 8: Relation zwischen AR, MR, VR und XR  
[Andrade und Bastos, 2019]

Lernanwendungen mit dem Fokus auf die Benutzer, sowie auch Serious Games und Anwendungen mit Spielementen ebnen den Weg für mehr transmediale Erfahrungen, durch den schlichten Einsatz von XR-Anwendungen [Liontas, 2014]. Ebenfalls im Fokus liegen zunehmend die psychischen Fähigkeiten eines Benutzers sowie innere Prozesse, um möglichst echte, positive Erfahrungen zu erzeugen [Bailenson, 2018; Chirico et al., 2016].

Jedoch auch Themen wie Sicherheit, Barrierefreiheit und Privatsphäre werden in Zusammenhang mit XR-Anwendungen abgedeckt. Dadurch können u.a. auch kollaborative Aspekte im frühen Entwicklungsprozess von XR-Anwendungen berücksichtigt werden [Reilly et al., 2014]. XR ist somit der Sammelbegriff für alle existierenden und zukünftig erscheinende Technologien und Systeme, welche durch die Erweiterung der Realität oder der Erstellung von neuen Realitäten gekennzeichnet sind<sup>4</sup>.

### 2.1.3 Ergonomie

Ein Interface soll einem Benutzer helfen, eine Aufgabe einfach, effektiv und mit wenig Aufwand durchführen zu können [Marcus et al., 2013]. Um z.B. mit virtuellen Objekten oder Umgebungen interagieren zu können, werden u.a. Interfaces benötigt, welche je nach Anwendung unterschiedlich in eine 3D-Umgebung eingebunden werden. Dabei sollten nicht nur die Art der Interaktionen, sondern u.a. auch der menschliche Körper mit seinen ergonomischen Möglichkeiten und Limitierungen berücksichtigt werden. Nur somit ist es möglich, Interfaces zu entwickeln, welche komfortabel und effektiv genutzt werden können. Unterschiedliche Interaktionen erfordern unterschiedliche Bewegungen, welche wiederum unterschiedlich komplex und andauernd sein können. Die Interaktionen haben dabei verschieden stark ausgeprägte Attribute wie:

- Genauigkeit
- Geschwindigkeit
- Richtung
- Dauer

Aufgrund der menschlichen Physiologie können bestimmte Interaktionen länger und präziser oder nur bedingt und umständlich umgesetzt werden, was bei der Implementierung von 3D User Interfaces (3DUIs) in XR zu beachten ist [LaViola et al., 2004]. Die menschliche Hand z.B. bietet durch ihre praktikable Ergonomie eine umfangreiche Palette an Einsatzmöglichkeiten. Darunter das Greifen oder Halten eines Gegenstandes, oder die Möglichkeit Gesten und Posen darzustellen. Ein unangenehmes Maß an Kraft, Dauer und Wiederholung einer Aufgabe, kann sich jedoch negativ auf die Erfahrung mit einem System auswirken, gleich wie gut ein Interface entwickelt wurde.

---

<sup>4</sup><https://www.qualcomm.com/news/onq/2017/05/31/extended-reality-convergence> - Zugriff am 19.08.2021

## Gorilla-Arm Syndrom

Ein wichtiger Aspekt in der Gestaltung von 3D User Interfaces (3DUIs) unter Berücksichtigung der Ergonomie des Menschen, ist das sogenannte “Gorilla arm syndrome“. Darunter wird das Ermüden der Arme durch lang andauernde und unbequeme Posen verstanden [Hincapié-Ramos et al., 2014]. Interfaces, welche auf Augenhöhe oder sogar darüber platziert sind, begünstigen den Gorilla-Arm Effekt. Darum sollten Interfaces möglichst niedrig gehalten oder Interaktionen näher an den Körper gebracht werden. Das Greifen eines weit entfernten Objektes könnte bspw. durch eine Pointer-Technik ermöglicht werden, um das Ausstrecken des Armes zu vermeiden [LaViola et al., 2004; Hincapié-Ramos et al., 2014]. Abbildung 9 verbildlicht eine schwach sowie stark begünstigende Position für die Ermüdung der Arme beim Einsatz von Gesten.

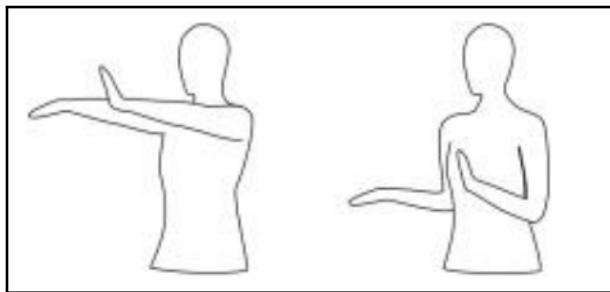


Abbildung 9: Stark (links) und schwach (rechts) ermüdende Gestenposition  
[Hansberger et al., 2017]

Ein Anzeichen für Ermüdung ist u.a. ein Haltungswechsel. Deshalb sollten Posen bevorzugt werden, welche komfortabel und energiesparend durchgeführt werden können und somit die Bequemlichkeit und Leichtigkeit unterstützen. Interfaces, welche sich am Arm oder auf der Hand befinden, haben dabei in Studien großen Zuspruch gefunden, da sich Arm- bzw. Hand-Interfaces ergonomisch günstig anbieten und viel Raum als auch Möglichkeiten für Interaktionen bieten [Harrison und Faste, 2014].

Komfort ist jedoch nicht gewährleistet unter reiner Berücksichtigung der aufgeführten Aspekte. Komfort ist ebenfalls bedingt, durch die Darstellung der Interfaces, bezogen auf Form und Gestalt [LaViola et al., 2004]. Da besagte Hand- bzw. Körperinterfaces relevant für die Anfertigung des für diese Arbeit geplanten Prototypen sind, werden On-body Interfaces im Kapitel 2.2.3 genauer behandelt. Im nächsten Abschnitt werden zunächst die beiden Begriffe Usability sowie User Experience erläutert und im Kontext dieser Arbeit eingegrenzt.

#### **2.1.4 Usability**

Nach Shackel [2009] steht der Begriff Usability (dt. Gebrauchstauglichkeit) für das einfache und effektive Erreichen einer Aufgabe, wobei einfach durch die subjektive Bewertung und effektiv durch den Grad der menschlichen Fähigkeiten einer Person definiert sind. Usability erfuhr jedoch aufgrund der zunehmenden Komplexität von Produkten und dem Fortschritt in der Mensch-Maschine-Interaktion stets neue Definitionen und Umstrukturierungen, was letztendlich zur Normierung von Usability durch den deutschen Normenausschuss Ergonomie (NaErg) geführt hat. Die ISO Norm 9241-11 beschreibt Gebrauchstauglichkeit als das:

“Ausmaß, in dem ein System, ein Produkt oder eine Dienstleistung durch die Zielpopulation in einem bestimmten Nutzungskontext genutzt werden kann, um festgelegte Ziele effektiv, effizient und zufriedenstellend zu erreichen.“

[Deutsches Institut für Normung e.V., 1999]

#### **Kontextuelle Ermittlung**

Die Benutzbarkeit eines Produktes ist u.a. vom Kontext der Verwendung abhängig. Kann ein Benutzer selbst gesteckte Ziele und Aufgaben effizient erfüllen und Anwendungen einfach erlernt werden, so weist z.B. eine Software oder ein Produkt eine hohe Usability auf [Richter und Flückiger, 2016]. Wichtige Faktoren die bei der Bewertung der Usability eines Produktes mit einfließen, sind jedoch nicht nur die Produkteigenschaften selbst, sondern die persönlichen Eigenschaften eines Benutzers bzw. der Nutzergruppe. Das sogenannte Contextual Inquiry, sprich das Erheben von Informationen im Benutzerumfeld, ist ein wichtiger Schritt in der Anforderungsanalyse, um ein Produkt zu entwickeln, welches nutzer- und aufgabengerecht sein soll. Dabei werden relevante Informationen, z.B. über:

- Ziele und Bedürfnisse
- Aufgaben
- Schwierigkeiten und Lösungsansätze
- Werte
- Ängste und Vorlieben
- Vorgehensweisen und Begriffe zum Fachbereich

gesammelt und in der Entwicklung berücksichtigt [Richter und Flückiger, 2016].

Jedoch auch sollten psychische und physische Faktoren mit in den Designprozess eines Produktes einfließen, da jeder Mensch mit einem Produkt unterschiedlich umgeht, respektive umgehen muss. Wahrnehmung, Intelligenz, Motorik sowie das Alter können sich auf die Usability eines Produktes für einen Benutzer auswirken [LaViola et al., 2004; Galitz, 2007].

Das Berücksichtigen der Zielgruppe, sowie der psychischen und physischen Fähigkeiten speziell, führt jedoch nicht zwingend zu einer hohen Usability. Mit unter haben die Fähigkeiten sowie die Vorbereitung und kreative Umsetzung durch die Entwickler, bezogen auf Softwareprodukte einen wesentlichen Einfluss auf die Realisierung eines Produktes. Bestimmte Konzeptmechaniken wie Personas und Szenarios, welche auf den erhobenen Zielgruppe-Daten basieren, können beim Konzipieren von Softwareprodukten helfen, nutzer- und aufgabenorientiert zu entwickeln. Die dabei entstehenden Use Cases und User Stories können des Weiteren helfen, die Spezifikation der funktionalen Anforderungen anzufertigen [LaViola et al., 2004].

## **Werkzeuge für Usability**

Um die Entwicklung von Softwareprodukten hingegen unabhängig von der gewählten Zielgruppe zu unterstützen, können bspw. Normen wie die ISO Norm 9241, gesetzliche Verordnungen zu den Mindestanforderungen an eine Mensch-Maschine-Schnittstelle [Rat der EU, 2007], Regelsammlungen wie bestimmte Usability Heuristiken [Nielsen, 1994], darunter z.B. Konsistenz, gute Fehlertexte und Fehlervermeidung, oder auch Vorlagen verwendet werden. Eine negative Usability soll durch die genannten Praktiken vermieden bzw. einer negativen Usability vorgebeugt werden. Schließlich führt eine negative oder niedrige Usability nach Norman [2008] z.B. zu:

- Wut und Frustration
- verringerte Produktivität
- hohe Fehlerraten
- Verletzungen
- Schäden an Geräten und Ausrüstung
- Verlust von Geld und Kunden

Genannte und weitere Kriterien, Richtlinien und Normen, werden für die Entwicklung des Prototypen dieser Arbeit sowohl im Konzept- als auch im technischen Umsetzungsschritt mit einbezogen, um eine niedrige bzw. negative Usability, bezogen auf den Prototypen, zu vermeiden. Im nachstehenden Abschnitt wird dafür der Begriff User Experience (UX) näher beleuchtet, als auch ein Vergleich zu Usability gezogen, welcher Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen Usability und User Experience (UX) aufzeigt.

### 2.1.5 User Experience

Wie auch Usability hat User Experience (UX) eine festgeschriebene Definition nach der Deutschen Industrie Norm (DIN). Die ISO Norm 9241-210 beschreibt UX als:

“Wahrnehmungen und Reaktionen einer Person, die aus der tatsächlichen und/oder der erwarteten Benutzung eines Produkts, eines Systems oder einer Dienstleistung resultieren.“

[Deutsches Institut für Normung e.V., 2011]

UX beschreibt im Gegensatz zu Usability demnach das subjektive Empfinden und Denken über ein Produkt vor, während und nach der Benutzung des Produktes. Emotionen, Ästhetik und weitere Faktoren bestimmen die Erfahrungen, welche ein Benutzer mit einem Produkt macht und bestimmen die Erinnerungen an als auch das Verlangen nach einem Produkt [Richter und Flückiger, 2016]. Der Joy of Use, sprich das Wohlbefinden beim Benutzen eines Produktes soll so hoch wie möglich sein.

Eine hohe Usability begünstigt, jedoch bedingt eine hohe oder gute UX nicht alleinstehend. Erfahrungen, Vorlieben, der psychische sowie physische Zustand eines Benutzers, die Einstellungen, Fähigkeiten als auch die Funktionalität, Systemleistung und die Darstellung eines Produktes, wirken sich auf die UX eines Benutzers aus [Deutsches Institut für Normung e.V., 2011].

Die UX eines Benutzers ist somit ein dynamischer Prozess, welcher u.a durch die genannten Faktoren beeinflusst werden kann. UX bezieht demnach im Vergleich zu Usability auch innere Prozesse wie Gefühle oder Gedanken mit ein, und ist hingegen zu Usability wandelbar [Ritsos et al., 2011].

## Mentale Modelle

Um eine hohe UX bei einem Benutzer zu erreichen, sollten neben den inneren dynamischen Prozessen und den Eigenschaften eines Produktes auch statische Gebilde wie die mentalen Modelle einer Person berücksichtigt werden. Jeder Mensch entwickelt beim Arbeiten mit Produkten, in diesem Kontext genauer Softwareprodukte, gewisse mentale Modelle, respektive eine Erwartungshaltung. Die Erwartungshaltung enthält sämtliche Erwartungen über die Verwendung eines Produktes, dessen Reaktionen, sowie ein intuitives Gefühl mit dem Produkt. Abbildung 10 verdeutlicht, wie ein Produktdesign einem intuitiven positiven Nutzungsgefühl entgegen wirken kann.



Abbildung 10: Ofen mit nicht intuitiver Bedienung  
[Norman, 2008]

## Usability vs. User Experience

UX ist nicht nur ein Erzeugnis nach der Fertigstellung eines Produktes, welches erst im Nachhinein behandelt werden kann, sondern ein essentieller Aspekt, der schon früh im Entwicklungsprozess miteinbezogen werden sollte [Galitz, 2007]. Aspekte wie Nutzen, Reaktionen auf ein Produkt und ein gewisses Empfinden mit einem Produkt, können einen wesentlichen Einfluss auf die UX eines Nutzers haben [Norman, 1988]. Demnach sind Usability und UX keine konträren Begriffe, sondern unterliegen einer bedingten Abhängigkeit und Beeinflussung.

Aufgrund der Miteinbeziehung der Gedanken- und Gefühlswelt eines Nutzers vor, während und nach der Benutzung eines Produktes steht UX im Vergleich zu Usability für einen umfassenderen Begriff und wird zunehmend als Ablöse für Usability betrachtet [Richter und Flückiger, 2016]. Im Kontext dieser Arbeit werden Usability und UX separat betrachtet, um eine genauere Aufteilung der Anforderungen und Kriterien bei der Entwicklung des Prototypen durchführen, als auch um Mensch und Maschine, respektive Software als zwei Komponenten betrachten zu können.

### 2.1.6 Feedback

Feedback ist in HCI sowie in den folgenden Kategorien von Interfaces ein wesentlicher Teil im Interaktions- und Interface-Designprozess. Feedback umfasst jegliche Art von Informationen, die einem Benutzer helfen, den Zustand eines Systems zu verstehen, als auch das Ergebnis von Operationen oder den Status einer Aufgabe einzusehen [LaViola et al., 2004]. Bei Benutzung von User Interfaces werden die Mensch-Maschine-Interaktionen bspw. in visuelles, auditives oder haptisches Feedback übersetzt und gegebenenfalls auf einem Bildschirm angezeigt. Visuelles Feedback kann z.B. in Form von Textmeldungen, auditives Feedback über Signale und haptisches Feedback über Vibrationen übermittelt werden. Die drei genannten Feedbackformen werden im Kapitel 2.2.3 u.a. mit direktem Bezug auf On-body Interfaces detaillierter beschrieben, da sich visuelles, auditives und haptisches Feedback im Fall von On-body Interfaces von 3D oder 2D User Interfaces in Punkten wie der Anzahl der Möglichkeiten oder der Implementation unterscheidet.

Wichtig beim Entwickeln von effektivem Feedback, gleich für welche Art von Interaktion und Interface, ist vor allem die feedback compliance bzw. die Feedbackübereinstimmung, was bedeutet, dass die Art des Feedbacks sowie die Übermittlung dessen, mit den Erwartungen eines Benutzers übereinstimmen müssen. Bewegt ein Benutzer eine Hand nach vorn um ein virtuelles Objekt zu bewegen, so muss das Objekt in die gleiche Richtung verschoben werden, auch directional compliance genannt. Andernfalls würde die Akzeptanz des Benutzers sowie die Performance sinken [Smith und Smith, 1987].

Ebenfalls muss Feedback zeitlich mit den Benutzereingaben übereinstimmen, sprich die Latenz zwischen Eingabe und Ausgabe muss für einen Benutzer ein akzeptables Maß einhalten, da sonst Nebeneffekte wie z.B. Cybersickness (Übelkeit) bzw. Motion Sickness im Falle von VR auftreten kann [Dünser et al., 2007; LaViola Jr, 2000]. Die zeitliche Übereinstimmung bzw. Zustimmung von Eingabe und Feedback wird als temporal compliance bezeichnet. Mitunter spielen dabei die frames per second (FPS), also die Bilder pro Sekunde, eine wichtige Rolle bei der Übermittlung von Feedback jeglicher Art. Generell ist Feedback kontextabhängig und muss passend zur Situation und zur Erwartung eines Menschen gestaltet sein [LaViola et al., 2004].

## 2.2 User Interfaces

### 2.2.1 Grafische User Interfaces

Vor dem Jahre 1980 wurden für Computerinteraktionen ausschließlich Command Line Interfaces (CLIs) eingesetzt, welche eine rein textuelle Interaktion zuließen, die über eine Tastatur stattfand. Grafische Elemente waren nicht interaktiv, die Befehle für das Command Line Interface (CLI) kompliziert und Interaktionen langatmig. Mit der Erfindung der Maus, sowie günstiger Technologien um Rastergrafiken darzustellen, entwickelten sich die ersten grafischen Benutzeroberflächen, die Graphical User Interfaces (GUIs) für ein größeres Publikum [LaViola et al., 2004].

GUIs erfahren vor allem seit dem Jahre 1980 einen immensen Zuwachs an Aufmerksamkeit sowie Verwendung und unterliegen einem stetigen Wandel als auch einer stetigen Weiterentwicklung. Komponenten wie die Maus oder die Tastatur, sorgten im 20. Jahrhundert für neue Wege der Interaktion zwischen Mensch und Maschine. Die interdisziplinäre Wissenschaft der HCI wurde interessanter und wichtiger. Die Einbeziehung und Erforschung von Wissen über die Wahrnehmung, Intelligenz, Sprache, Soziologie, Grafikdesign sowie industrielles Design und menschliche Faktoren wie Ergonomie lenken seither den Fortschritt von 3D User Interfaces (3DUIs) [LaViola et al., 2004].

### 2.2.2 3D User Interfaces

3D User Interfaces (3DUIs) beinhalten die Verwendung von Input sowie Output Devices, sprich Eingabe- und Ausgabegeräten, welche einem Benutzer die Möglichkeit geben, Informationen an eine Maschine bzw. einen Computer zu senden, als auch Informationen von einer Maschine bzw. einem Computer zu erhalten. Traditionelle Eingabegeräte sind u.a. die Maus, Tastatur, Finger oder die menschliche Stimme. Traditionelle Ausgabegeräte sind bspw. Bildschirme, als auch wiederum die Stimme und Audio allgemein [Galitz, 2007].

Den Zusatz 3D erhalten Interfaces dann, wenn eine dreidimensionale Interaktion zwischen Mensch und Maschine stattfindet, sprich eine 3D Interaktion. Zum Beispiel kann der Einsatz von Handgesten oder von Bewegungen in einem Raum, den Zustand von zweidimensionalen Objekten ändern. Jedoch auch das Verwenden einer Maus in einer 3D-Anwendung zum Positionieren eines 2D-Objektes ist eine 3D Interaktion, da eine 2D-Anweisung in eine 3D-Koordinate umgewandelt wird, wodurch auch ein User Interface (UI) bestehend aus Maus, Tastatur und Bildschirm als 3D User Interface (3DUI) betrachtet werden kann [LaViola et al., 2004].

Durch die stetige Weiterentwicklung sowie die zunehmende Komplexität und Digitalisierung der Welt, finden User Interfaces (UIs) sowie 3DUIs u.a. Verwendung in den Bereichen:

- Design
- Unterhaltungsbranche
- Simulationen und Bildung
- Kunst und Architektur
- Medizin
- Kollaboration und Robotertechnik

Dabei kommen jedoch nicht mehr nur traditionelle Methoden wie Maus- und Tastatureingaben sowie Monitore zum Einsatz. Neue technologische Fortschritte in der Verarbeitung und Erkennung von Gesten [Mistry und Maes, 2009] oder diverse Sensoren zur Positions- und Orientierungserfassung [Turk und Fragoso, 2015] im dreidimensionalen Raum, erweitern die Palette der nicht traditionellen, neuen Eingabemethoden. Hmds genauso wie stereoskopische Projektionsbildschirme als auch haptische, greifbare Geräte ergänzen die Möglichkeiten an Ausgabegeräten mit zunehmender Beliebtheit [LaViola et al., 2004; Bowman und Laviola, 1999].

Die Etablierung von AR, MR und VR beeinflusste die Entwicklung von UIs respektive 3DUIs immens. Eine klassische Tastatur bspw. führt bei Verwendung in einer VR-Anwendung zu einer unnötig komplizierten und nicht intuitiven Benutzung, genauso wie eine Maus in einer AR-Anwendung zu verwenden. Beide Methoden resultieren in einer schlechten Benutzerfreundlichkeit. Daraus entstanden neue Herausforderungen für UI Designer, sowie eine Fokussierung auf Eingabemethoden wie Gesten und der menschliche Körper [Bowman und Laviola, 1999].

### 2.2.3 On-body User Interfaces

On-body Interfaces instrumentalisieren den menschlichen Körper als Ein- bzw. Ausgabegerät. Die starke emotionale und persönliche Verbundenheit zum eigenen Körper gewähren ein intuitives Gespür für den eigenen Körper, als auch für externe Ein- und Auswirkungen [Hertenstein et al., 2009, 2006; Weigel et al., 2014]. Das Gefühl für den eigenen Körper entwickeln Menschen bereits im Kindesalter als auch den eigenen Körper als Werkzeug einzusetzen sowie durch Berührung mit der Welt zu interagieren [Hertenstein, 2002; Montagu, 1972].

Der menschliche Körper bietet durch die große Fläche an Haut und die anatomischen Gegebenheiten viele Möglichkeiten für Interfaces und Interaktionen [Weigel et al., 2014]. Bevorzugt verwendet werden mitunter die On-skin Interfaces, sprich Interfaces, welche keine am Körper befestigte externe Gerätschaften zur Interaktion benötigen, sondern lediglich den eigenen Körper verwenden. Benötigt werden dafür jedoch bestimmte Technologien wie Projektoren, Sensoren oder Kameras, welche mithilfe von Tiefeninformationen und 3D-Funktionalität, bspw. Hände erfassen und Gesten erkennen können [Weigel et al., 2014]. Verwandte Arbeiten, welche besagte On-skin Interfaces bzw. On-body Interfaces verwendet und untersucht haben, werden im Abschnitt 2.4.1 vorgestellt. Dabei wird zwischen Interfaces mit aktiven und passiven Sensoren nach LaViola Jr [2014] unterschieden, welche hieran anschließend beschrieben werden.

### **Aktive Sensoren**

Aktive Sensoren respektive active sensors sind all diejenigen Sensoren bzw. Interfaces, die von einem Benutzer voraussetzen, ein Gerät oder mehrere Geräte in den Händen zu halten oder am Körper zu tragen, z.B. als Gürtel oder Armband. Daraus resultieren die “Active On-body User Interfaces“, wofür Beispiele im Kapitel 2.4 dieser Arbeit angeführt werden.

### **Passive Sensoren**

Passive Sensoren bzw. passive sensors hingegen setzen keine am Körper befestigte oder tragbare Geräte ein und benötigen ausschließlich Bildverarbeitungssysteme, die Bilder aufnehmen, durch gewisse Algorithmen verarbeiten und daraufhin entsprechende Reaktionen oder Funktionen auslösen [LaViola Jr, 2014]. Darunter fällt z.B. ein System, welches ausschließlich mit Projektionen und Gestenerkennung arbeitet. Die so aufgebauten Interfaces werden “Passive On-body User Interfaces“ genannt und ebenfalls durch konkrete Beispiele im Kapitel 2.4 beschrieben.

Anschließend an dieses Kapitel folgen Beschreibungen zu drei Feedbackformen, um u.a. die Arbeiten im Kapitel 2.4 über aktive und passive Sensoren nachvollziehen zu können und den relevanten Rahmen für Feedback in Bezug auf On-body Interfaces abzubilden und einzugrenzen. Die aufgeführten Feedbackformen finden dabei nicht nur Anwendung im Bereich On-body, sondern auch bei On-skin Interfaces und werden durch jeweilige Beschreibungen und Beispiele konkretisiert. Die dabei gesammelten Informationen sind zusätzlich für die Konzeption und Entwicklung des zu entwickelnden Prototypen von Bedeutung.

#### **2.2.4 Feedback für On-body User Interfaces**

Die Feedbackformen bei On-body Interfaces decken sich teilweise mit den Standardformen von 3DUIs, werden jedoch aufgrund der verfügbaren Dreidimensionalität, sprich der physischen Präsenz von externen Geräten oder dem eigenen Körper, durch weitere Arten ergänzt. Die folgenden drei Feedbackformen finden Verwendung in allerlei On-body bzw. On-skin Szenarien und werden mithilfe vorangegangener Arbeiten beschrieben, die auch partiell im Kapitel 2.4 unter bestehender Relevanz zu dieser Arbeit ausführlicher erläutert werden.

#### **Visuelles Feedback**

Visuelles Feedback ist das am häufigsten eingesetzte Feedbackformat in Bezug auf On-body bzw. On-skin Interfaces [Harrison et al., 2012]. Harrison und Wilson [2011], Harrison et al. [2011] und Xiao et al. [2018] beispielsweise verwenden visuelles Feedback, um anzuzeigen, dass eine Funktion erfolgreich ausgewählt wurde. Auch kann Echtzeitfeedback in Form von visuellem Feedback umgesetzt werden. Das Vergrößern einer Karte bspw. durch eine Handgeste besitzt eine in sich logische visuelle Repräsentation durch eine anschließend kleinere oder größere Veranschaulichung [Mistry und Maes, 2009]. Auch nutzt das System von Harrison und Wilson [2011] visuelles Feedback, um anzuzeigen dass z.B. das projizierte Interface in der Hand öffentlich einsehbar oder verdeckt ist. Kohli und Whitton [2005] bietet wie auch Harrison und Wilson [2011] eine visuelle Bestätigung für ausgewählte Bedienelemente oder ausgeführte Funktionen, welche z.B. grün oder rot aufleuchten. Visuelles Feedback ist für Menschen eine natürliche Reaktion auf eine Vielzahl von diversen Aktionen und beim Einsatz von On-skin bzw. On-body interfaces, welche sich auf einem Unterarm oder einer Hand befinden intuitiv [LaViola et al., 2004].

#### **Haptisches Feedback**

Haptisches Feedback wird in zwei Unterkategorien aufgeteilt, welche sich aufgrund der Form der Wahrnehmungsform und der menschlichen Sensoren, die dafür aktiviert werden. Kinästhetisches Feedback bedeutet Objekte durch innere Sensoren in Muskeln und Gelenken wahrzunehmen. Die Sensoren helfen dabei, z.B. das Gewicht eines Objektes, die Position des Objektes sowie die Position des Objektes zu bestimmen, wenn es sich in der eigenen Hand befindet [LaViola et al., 2004; Galitz, 2007]. Taktiles Feedback bedeutet vor allem, ein Gefühl für Objekte zu haben, welche sich in oder auf den Fingern bzw. anderen Gliedmaßen und Körperregionen befinden. Dadurch können Effekte wie Vibration, Druck, Berührung oder Textur wahrgenommen werden [Bau und Poupyrev, 2012].

[Kohli und Whitton, 2005] nutzen die dominante Hand um auf der nicht dominanten Hand zu interagieren. Die Propriozeption, also das Gefühl für den eigenen Körper hilft dabei, präzise und ohne visuelle Hilfe auf einer Handfläche zu navigieren [Milgram und Kishino, 1994]. Das taktile Feedback unterstützt die Navigation der Hände, um die Fehlerrate zu reduzieren. Bei Weigel et al. [2014] hingegen wird visuelles durch taktiles Feedback erfolgreich ersetzt, obwohl ein imaginäres Interface, also keinerlei sichtbare Interface-Elemente eingesetzt wurden. Das imaginäre Interface nutzt schlicht die Vorteile des eigenen Körpergefühls, sowie die Vorstellungskraft eines Nutzers, um Bedienelemente ausführbar, wiedererkennbar und zielführend einzusetzen [Gustafson et al., 2010].

### Auditives Feedback

Auditives Feedback bezeichnet sämtliche Signale, Töne und Geräusche, die als Output in einem System als Folge auf jeglichen Input eingesetzt werden können [Galitz, 2007; Weigel et al., 2014]. Harrison et al. [2011] setzen auditives Feedback ein, um auf bioakustische Eingaben zu reagieren. Bioakustische Eingaben sind Schwingungen, die durch die menschliche Haut aufgrund von Druck oder Stärke-Einwirkungen gesendet werden. Daraufhin ertönen Signale, um einem Benutzer des Systems zu signalisieren, welche Funktion ausgeführt wurde. Ebenso verhält sich das System von Kohli und Whitton [2005], welches zusätzlich zum haptischen Feedback Signale ertönen lässt, wenn ein Benutzer erfolgreich einen vorgesehenen Button gedrückt hat. Auditives Feedback wird außerdem beim Erkennen von Bewegungen wie Gesten eingesetzt, um eine erfolgreiche Erfassung der Eingabedaten zu signalisieren [LaViola Jr, 2014].

Je nach Kontext, Verwendungszweck, Einsatz externer Gerätschaften sowie auch ob On-skin oder On-body Interaktionen eingesetzt werden fällt die Feedback-Wahl unterschiedlich aus. Die Eignung einer Feedbackform und damit auch eines Systems an sich, richtet sich nach den Anforderungen eines Systems an einen Benutzer und umgekehrt [LaViola et al., 2004]. Die daraus ableitbaren Anforderungen an ein On-body Interface und damit an den zu entwickelnden Prototypen, sind in Kapitel 3.1.1 festgehalten.

## 2.3 Produktentwicklung

Um ein Interface zu entwickeln, welches sowohl nutzer- als auch aufgabenorientiert fungiert, muss ein Grundverständnis für die dementsprechende Zielgruppe und dessen Aufgaben vorausgesetzt werden. Was macht die Zielgruppe aus, was muss beachtet werden, welche Aufgaben absolviert die Zielgruppe und welche Erkenntnisse sind dafür notwendig. Die genannten und weitere Aspekte werden im folgenden Kapitel behandelt und beantwortet.

Des Weiteren werden wesentliche Begriffe im CAD-Kontext wie Produktlebenszyklus (PLC), Produktentstehungsprozess, Computer-aided Everything (CAx) und Computer-aided design (CAD) erläutert, sowie explizit auf Produktentwickler, für die das in dieser Arbeit zu entwickelnde prototypische Interface angedacht ist, eingegangen und essentielle Faktoren aufgeführt.

### 2.3.1 Definition

Bevor ein Produkt hergestellt werden kann, bedarf es diverser Schritte, welche unter dem Begriff der Produktentwicklung zusammengefasst werden. Produktentwicklung wird nach dem Verband Deutscher Ingenieure (VDI) durch die Richtlinie 2221 folgendermaßen definiert:

“Entwickeln/Konstruieren ist die Gesamtheit aller Tätigkeiten, mit denen ausgehend von einer Aufgabenstellung die zur Herstellung und Nutzung eines Produktes notwendigen Informationen erarbeitet werden und die in der Festlegung der Produktdokumentation enden.“ [Ingenieure, 1993]

Die beiden Elemente Produktentstehung und anschließende Produktion gehören im 21. Jahrhundert stets zusammen und umfassen verschiedene iterative Abläufe und Prozesse, wie den Produktlebenszyklus (PLC) und den darin enthaltenen Produktentstehungsprozess, welche aufgrund neuer Technologien, Arbeitsabläufe und Arbeitsweisen sowie einer zunehmend zeit-intensiveren Wirtschaftslage an Komplexität und Umfang zugenommen haben [Vajna et al., 2018]. Die Time to Market, sprich die Dauer bis ein Produkt auf den Markt kommt, wird zunehmend wichtiger und erfordert von Produktentwicklern, bzw. Konstrukteuren ein umfassendes Wissen sowie Management- und Moderationskompetenzen [Vajna et al., 2018; Eigner und Stelzer, 2009].

Nachfolgend wird auf grundlegende Begriffe wie den PLC eingegangen, um ein Grundverständnis für die Produktentwicklung und dazugehörige Faktoren und Methoden herzustellen. Daran anschließend folgen Begriffserklärungen zu Computer-aided Everything (CAx) und Computer-aided design (CAD), als auch eine tiefer reichende Definition der Produktentwickler.

### 2.3.2 Produktlebenszyklus

Die Produktentwicklung geschieht in iterativen Phasen, welche in einen Kreislauf eingebunden sind. Der Produktlebenszyklus (PLC) beschreibt die aufeinander folgenden Phasen, von der Planung bis zum Produktrecycling. Der PLC wird ganzheitlich durch sieben Phasen in Abbildung 11 beschrieben. Angefangen beim Sammeln von Anforderungen zirkuliert der PLC u.a. über die Produkt- und Prozessplanung, hin zur Produktion und endet im Produktrecycling.

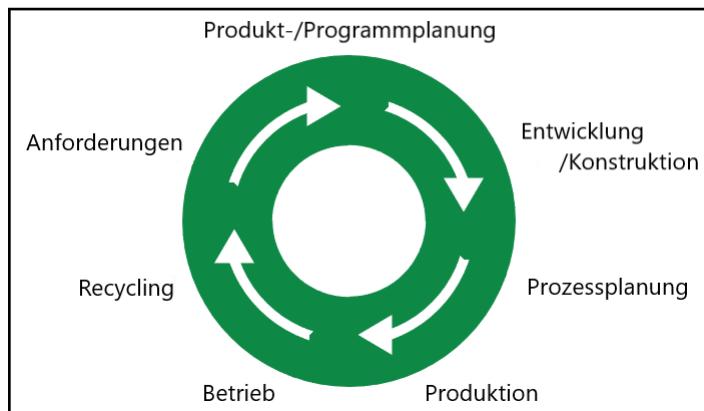


Abbildung 11: Produktlebenszyklus  
[Eigner, 2014]

Zur Produktplanung gehören bspw. die Auswahl der Methodik sowie eine Konzeption. Bei der Entwicklung zählen u.a. das Testen und eine ausreichende Dokumentation zum Produkt dazu. Die Produktion deckt die Herstellung sowie den Zusammenbau bzw. die Montage sowie die Qualitätssicherung ab, der Betrieb die Verbreitung des Produktes, Service- und Wartungsaufgaben [Eigner und Stelzer, 2009]. Die genannten Disziplinen werden von Produktentwicklern/Konstrukteuren abgenommen, durchgeführt oder mitbetreut, was zuvor u.a. auch Aufgaben von Managern waren. Typische Aufgaben wie das Administrieren, Kommunizieren oder das Informieren über Entscheidungen verlagert sich auf den Aufgabenpool im Entwurfs- und Konstruktionsprozess, zusätzlich zu den kreativen Aufgaben von Konstrukteuren [Eigner und Schleidt, 2006].

### 2.3.3 Produktentstehungsprozess

Der Produktentstehungsprozess ist ein wesentlicher Teil des PLC und umfasst eine Vielzahl ineinander greifender Aufgabenstellungen, die von Produktentwicklern gelöst werden müssen. Modellhafte Vorstellungen und Gedanken unterstützen die Konstrukteure während der Anwendung von CAx- und CAD-Systemen, um den Produktentstehungsprozess zu beschleunigen bzw. zu vereinfachen [Vajna et al., 2018].

Als Resultat entsteht ein Produkt samt aller Produktionsunterlagen, darunter z.B. Produktbeschreibungen, Spezifikationen, Entwürfe und digitale Modelle. Jedoch auch werden gewisse Prozesse und Artefakte wie die Produktplanung, die Machbarkeitsanalyse, das Produktdesign, Berechnungen und Simulationen des Produktverhaltens im Produktentstehungsprozess umgesetzt und inkludiert, die für eine vollständige elektronische Beschreibung eines virtuellen Produktes sorgen [Eigner und Stelzer, 2009].

### 2.3.4 Computer-aided Everything

Computer-aided Everything (CAx) gilt als allgemeiner Bezeichner für sämtliche rechnerunterstützte Verfahren wie Computer-aided design (CAD), Computer-aided engineering (CAE) oder Computer-aided styling (CAS) [Eigner und Stelzer, 2009] und steht für die konsequente Weiterentwicklung rechnerunterstützter Methoden, Vorgehensweisen und Werkzeugen in der Produktentstehung [Eigner und Stelzer, 2009; Vajna et al., 2018]. Tabelle 1 gibt einen Überblick über CAx-Begriffe und Prozesse, welche v.a. im Bezug auf die Produktentstehung und -entwicklung von Relevanz sind. Dabei wird lediglich ein Auszug aller Disziplinen dargestellt, der jedoch in Bezug auf Produktentwickler Gewicht hat.

CAD	Computer-aided design	Rechnerunterstütztes Konstruieren
CAE	Computer-aided engineering	Berechnen und Simulieren mithilfe Berechnungsprogramme
PDM	Product data management	Management der Produktdaten während der Produktentwicklung
PLM	Product lifecycle management	Vorausplanen aller Lebensphasen eines Produktes sowie die Ermittlung und Auswertung der dabei gesammelten Daten

Tabelle 1: Auszug relevanter CAx-Disziplinen für Produktentwickler  
nach [Vajna et al., 2018]

CAx-Systeme sind nicht ohne Grund ein Sammelbegriff für viele rechnerunterstützte Verfahren, denn CAx-Systeme werden in etlichen Bereichen darunter die Automobil- und Flugzeugindustrie eingesetzt, jedoch auch in der Konsumgüter- und Investitionsgüterindustrie.

Die Komplexität von 3D-fähigen rechnerunterstützten Modellierung- und Managementanwendungen nimmt stetig zu und setzt ein umfassendes Wissen der Konstrukteure voraus [Vajna et al., 2018; Tornincasa et al., 2010]. Die bereits in 2.3.1 definierte Time to Market tickt schneller und verkürzt die verfügbare Zeit für Spezialisten, ein Produkt mit den erwünschten Funktionen erfolgreich mit zufriedenstellender Qualität auf den Markt zu bringen. Darum sind automatisierende, leicht zu bedienende und vielfältige Hilfsprogramme notwendig, die u.a. langwierige Ausbildungen und bedingungslose Hingabe für gelernte Techniken zeitsparend und sinnvoll ergänzen [Tornincasa et al., 2010].

CAx-Systeme unterstützen Produktentwickler sowohl in der Gestaltungs- als auch in der Dokumentationsphase. Die dabei eingesetzten Interfaces mangeln jedoch an Konsistenz und fehlender intuitiven Bedienung, wodurch die Usability und Handhabung solcher Anwendungen leidet [Vajna et al., 2018; Waern, 1988]. Vorhandene Dokumentationen zur Komplexitätsreduzierung scheitern an Unübersichtlichkeit und Anpassungsmöglichkeiten für verschiedene Einsatzgebiete und Bedürfnisse, wodurch die Systeme kompliziert bleiben [Vajna et al., 2018; Kalawsky, 1997]. Denkbar wären z.B. Systeme, die sich die Fähigkeiten und Kenntnisse eines Benutzers merken und anhand dessen die Interfaces anpassen. Dadurch könnten CAx-Interfaces intuitiver und auch benutzerfreundlicher werden, wodurch die Komplexität der vielschichtigen CAx-Anwendungen reduziert werden könnte [Vajna et al., 2018].

### 2.3.5 Computer-aided Design

Computer-aided design (CAD) wurde erstmals in den sechziger Jahren des 20. Jahrhunderts als “Rechnerunterstütztes Entwerfen und Konstruieren” definiert [Ross, 1956]. Das erste interaktive CAD-System SKETCHPAD, zum Entwerfen und Konstruieren, wurde von I. E. Sutherland [Sutherland, 1964], dargestellt in Abbildung 12, entwickelt. Firmen wie Autodesk oder Apple prägten daraufhin die siebziger und achtziger Jahre der CAD-Geschichte durch erste auf einem PC lauffähige, jedoch kostspielige CAD-Anwendungen wie AutoCAD oder MiniCAD [Tornincasa et al., 2010].



Abbildung 12: Ivan Sutherland's SKETCHPAD  
[Sutherland, 1964]

Nachdem 1994 das erste 32-Bit fähige Windowssystem von Microsoft erschienen ist, folgte mit SolidWorks 1995 das erste 3D-fähige CAD-System. Seit dem 21. Jahrhundert erfuhrn CAD-Systeme stetige Anpassungen, Erweiterungen und Verbesserungen. Die Idee dabei war stets das Vereinfachen von Modellierungs- und Integrationsaufgaben im Bereich des Entwerfens und Modellierens, z.B. durch das Beschreiben von Eigenschaften oder Geometriefunktionen. Die Dreidimensionalität lässt dabei im Vergleich zu früheren zweidimensionalen Anwendungen eindeutigere und vollständigere jedoch vor allem realitätsnahe Objektbeschreibungen, welche als Basis für vielerlei Animations-, Berechnungs- oder auch Simulationsverfahren dienen können [Vajna et al., 2018]. Auch lassen sich durch 3D Fehler früher erkennen bzw. vermeiden und auch sinkt der Aufwand für zu verwaltende Dokumente, da aus den 3D-Modellen gewisse Informationen automatisch abgeleitet werden können [Vajna et al., 2018; Tornincasa et al., 2010]. Dadurch können Produktentwickler rapide Modelle entwerfen, ohne Vorkenntnisse für 3D-Modellierungen zu besitzen. Das SolidWorks 3D CAD-System ist in Abbildung 13 aufgeführt.

Aufgaben wie das Importieren von Einzelteilen, das Verstecken und Anzeigen von verschiedenen Teilen in komplexen Gebilden oder das Durchführen diverser Modifikationen wie Bewegen, Rotieren und Skalieren sind essentielle Aufgaben die von Konstrukteuren anhand von Peripherie und Menüs in Anwendungen wie SolidWorks durchgeführt werden [Wang et al., 2011].

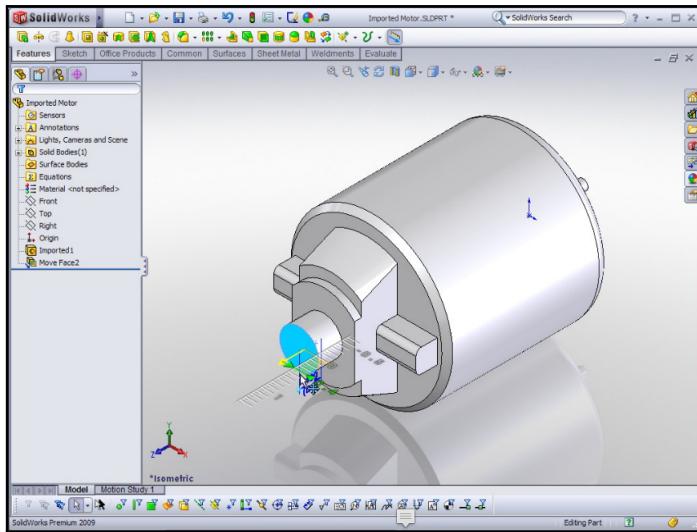


Abbildung 13: Solidworks 3D CAD-Anwendung  
[Tornincasa et al., 2010]

CAD-Systeme bzw. CAD generell ist jedoch nicht nur ein Verfahren zum Entwerfen und Modellieren, sondern bietet Konstrukteuren auch eine Umgebung für Analyse- und Herstellungsaufgaben, um simultan Aufgaben zu erledigen. Dadurch werden die Anwendungen jedoch auch zunehmend komplexer und benötigen u.U. Expertenwissen oder komplizierte Kommandos, um die neuen Funktionen einsetzen zu können.

Komplizierte CAD-Interfaces wirken sich negativ auf die Zufriedenheit, Effizienz und Zuverlässigkeit eines Benutzer aus und beeinflussen somit auch u.a. die Qualität von Produkten [Kosmadoudi et al., 2013]. In einer empirischen Studie hat Waern [1988] bspw. herausgefunden, dass Produktentwickler bzw. Konstrukteure die Vielzahl an Alternativen, sprich Kommandos und Wege um ein Produkt zu entwerfen kognitiv nicht erfassen können und daraufhin eine Tendenz für bereits erfolgreiche Wege zu entwickeln, welche dann auf folgende Aufgaben und Probleme angewendet wird. Auch [Luczak et al., 1991] untersuchte die Effizienz von Produktentwicklern bei Verwendung von CAD-Anwendungen und ermittelte negative Beeinträchtigungen durch komplizierte Interfaces.

Komplizierte Menüfunktionen und -verschachtelungen erschweren die Bedienung der umfangreichen CAD-Systeme, gleich ob ein Benutzer ein Anfänger oder Experte ist. Auch fehlen aktive und interaktive Hilfen wie grafische Elemente, Hilfstexte oder Ähnliches. Dabei ist die Verarbeitung von Wissen eine wesentliche Aufgabe von Produktentwicklern und wird durch Interface-Probleme erheblich beeinflusst [Vajna et al., 2018].

Des Weiteren wurde durch die Studie bekannt, dass Konstrukteure erlernte Routinen nutzen statt neue, komplexere, jedoch mächtigere Funktionen zu nutzen. Immens beeinflusst wird dadurch die Kreativität der Konstrukteure. Die kognitiven Ressourcen werden nicht mehr für Lernzwecke, sondern nur noch für die erlernten Strategien eingesetzt [Waern, 1988; Black, 1990; Robertson und Radcliffe, 2009].

Ein weiterer Negativeffekt tritt beim Einsatz der Peripherie auf. Klassische Maus und Tastatureingaben lenken Konstrukteure von kreativen und kognitiv anspruchsvollen Aufgaben ab, weshalb sich Konstrukteure eher auf 3D-Mäuse und neue Technologien wie natural interfaces, sprich Interfaces mit natürlichen Interaktionen wie Gesten und Sprache oder XR-Technologien wie CAVEs fokussieren sollten [Kosmadoudi et al., 2013; Fiorentino et al., 2006].

Im nachfolgenden Kapitel werden zunächst Produktentwickler, deren Aufgaben, Voraussetzungen, Fähigkeiten und Bedürfnisse sowie angewandte Praktiken und eingesetzte Tools behandelt. Dabei werden auch Technologien wie 3D-Mäuse als Eingabegeräte in CAD ausführlicher erläutert.

### 2.3.6 Produktentwickler

#### Definition

Wie bereits in Kapitel 2.3.1 erläutert, sind Produktentwickler nicht mehr nur Konstrukteure für 2D und 3D-Modelle, sondern führen u.a. Aufgaben im Entwurf, in der Dokumentation und Kommunikation sowie im Management aus [Eigner und Schleidt, 2006]. Nach Brandenburg [2019] sind Produktentwickler bzw. Konstrukteure Personen:

“die Informationen über die Varianten generieren, präsentieren und visuell aufarbeiten. Sie sind bestrebt, die eigene Variante zu ’verkaufen’.“

Varianten bedeutet dabei, eine Konstruktion nach bekannten Vorbildern und Vorgängern anzufertigen wobei Attribute wie Größe, Form oder Lage noch verändert und optimiert werden können, wohingegen bei Neukonstruktionen völlig neue Problemstellungen behandelt und bei Anpassungskonstruktionen auf Vorbilder bzw. Vorgänger zurückgegriffen wird, jedoch die Vorgängermodelle durch mehr Anforderungen erweitert und somit neue Lösungen notwendig werden [Vajna et al., 2018]. Dafür besitzen Produktentwickler Kenntnisse und Fertigkeiten in Konstruktions- und Simulationssoftware, sowie thematische Begriffe und Kennwerte.

Durch Präsentationen werden konstruktive Zeichnungen und Simulationsmodelle den Entscheidungsträgern dargeboten und zusammen diskutiert [Brandenburg, 2019]. Der teamorientierte Ansatz wird auch in [Eigner und Stelzer, 2009] beschrieben. Entscheidungen, welche zuvor in anschließenden Phasen stattfanden, werden in den Entwurfs- und Konstruktionsprozess verlagert und machen Produktentwickler somit auch zu verantwortungsvollen Positionen mit Entscheidungsgewalt.

## Aufgaben

Zusätzlich zu den konstruktiven und technischen Fähigkeiten, wie z.B. das Anfertigen von 2D-Skizzen oder 3D-Modellen, zählen u.a. administrative, kommunikative und verwaltende Fähigkeiten als auch die Verantwortung für Aspekte wie Functionality und Usability zu den Aufgaben eines Produktentwicklers [Vajna et al., 2018]. Die Entwurfs- und Konstruktionsaufgaben werden jedoch nicht mehr nur über traditionelle Ein- und Ausgabegeräte durchgeführt, sondern wie in Kapitel 2.4.3 beschrieben, durch zahlreiche XR-Technologien erweitert oder sogar ersetzt.

Klassische Aufgaben wie das Importieren von Modellteilen, das Arbeiten mit komplexen Bauteilen und Modellen sowie das Modifizieren von Objekten durch geometrische Funktionen wie Bewegen, Drehen und Skalieren bilden das Grundgerüst für alle Konstruktionen. Dabei greifen Produktentwickler u.a. auf gesammelte Informationen aus der Recherche in der Recherchephase zurück, sowie auf Anforderungen von Entscheidungsträgern und Kollegen aus der Entwurfsphase [Wang et al., 2011; Vajna et al., 2018].

Nach der VDI-2221 Richtlinie [Vietor et al., 2018] gehören zur Recherche von notwendigen Informationen bspw. auch Informationen zu relevanten Märkten, Technologien und zukünftigen Trends, die in darauf folgenden Phasen benötigt werden. Dadurch lassen sich sogenannte alternative Produktprofile erarbeiten, die je nach Bedarf und vorherrschender Situation am Markt, sowie unter Berücksichtigung der Anforderungen definiert werden. Eine verstärkte Einbeziehung der ausgewählten Nutzergruppe sowie der Projekt-Kunden ermöglicht daraufhin eine erste Beurteilung des Potenzials der neuen Innovation. Alternative Lösungsprinzipien und Entwürfe der Strukturen resultieren schließlich aus den ausgewählten Produktprofilen und werden durch Prototypen, die unter Kunden- und Nutzereinbindung entstehen, validiert. Die Konstruktionen sind jedoch nicht die einzigen Erzeugnisse eines Produktentwicklers.

Vollständige elektronische Dokumentationen und Konzeptionen müssen für jedes Produkt angefertigt und in Produktdatenmanagement (PDM)-Systemen abgespeichert werden. Dafür werden Schnittstellen zwischen CAD- und PDM-Systemen genutzt, wobei die Verwaltungs- und Organisationsfähigkeiten eines Produktentwicklers greifen [Kosmadoudi et al., 2013; Vajna et al., 2018]. Mitunter werden auch Analysefunktionen in fortgeschrittenen CAD-Systemen genutzt, um die Qualität bzw. die Marktreife eines Produktes zu überprüfen [Brown, 2009]. Die Aufgaben sind nochmals stichpunktartig in Tabelle 2 aufgelistet.

A	Recherche von Informationen zu relevanten Märkten, Technologien und zukünftigen Trends
B	Treffen von Entscheidungen in Entwurf- und Konstruktionsphase
C	Entwurf und Konstruktion von 2D Skizzen und 3D-Modellen
D	Erarbeitung alternativer Produktprofile nach Bedarf und Marktsituation
E	Anfertigung von Simulationsmodellen und Präsentationen
F	Administration von Informationen in PDM-Systemen
G	Einbeziehung der Nutzergruppe und Projekt-Kunden für Beurteilung des Innovationspotenzials
H	Kommunikation von Produktvarianten mit Entscheidungsträgern und Kollegen
I	Erstellung von Lösungsprinzipien und Strukturentwürfen aus Produktprofilen
J	Validieren der Strukturentwürfe anhand von Prototypen
K	Verfassen von Dokumentationen und Produktbeschreibungen
L	Analyse vorhandener und neuer Konstruktionen zur Qualitätssicherung

Tabelle 2: Aufgaben eines Produktentwicklers

## Fähigkeiten

Zu den konstruktiven und technischen Aufgaben von Produktentwicklern gehören jedoch auch administrative, kommunikative und organisatorische Fähigkeiten wie verantwortungsvolle und logische Entscheidungen zu treffen und Dokumentationsfertigkeiten [Eigner und Stelzer, 2009; Vajna et al., 2018]. Gleichzeitig werden die zahlreichen CAx-Systeme mit denen Produktentwickler hantieren komplexer, weshalb eine gewisse Lernbereitschaft und Anpassungsfähigkeit vorausgesetzt wird, jedoch bereits gelernte Praktiken und Techniken verinnerlicht und schnell abrufbar sein sollten [Kosmadoudi et al., 2013].

Ein maßgebender Faktor für schnelles und dennoch qualitativ hochwertiges Arbeiten ist u.a. die Time to Market, also die Zeit, bis ein Produkt auf den Markt kommt. Durch Faktoren wie die Time to Market müssen Produktentwickler zunehmend effektiver und effizienter arbeiten, was sich auch auf die Arbeitsqualität von Produktentwicklern auswirkt [Eigner und Stelzer, 2009]. Auch kommen analytische Fähigkeiten zum Erkennen von Messfehlern und Erfahrungen über Verfahren zur Lösung von Modellproblemen dazu, um bspw. Rechenergebnisse zu überprüfen wodurch die Qualität von Simulationen sichergestellt werden kann [Vajna et al., 2018]. Der Einsatz von XR-Technologien wie CAVEs [Tornincasa et al., 2010] oder MR-Brillen [Newnham et al., 2018] kann zwar Produktentwickler u.a. bei Montageaufgaben [Funk et al., 2017] unterstützen, erfordert jedoch auch eine gewisse Adaptionsbereitschaft und Umstellung wodurch bewährte Denk- und Herangehensweisen angepasst werden müssen [Eigner und Stelzer, 2009; Fiorentino et al., 2006; Wang et al., 2011]. Die Anforderungen an sowie die Fähigkeiten eines Produktentwicklers sind in Tabelle 3 aufgeführt.

A	Technische Fähigkeiten und Kenntnisse im Konstruieren mit CAx-Systemen
B	Logisches Schlussfolgern und Verantwortungsbewusstsein
C	Dokumentationsfertigkeiten analog und digital
D	Administrative, kommunikative und organisatorische Fähigkeiten
E	Lernbereitschaft und Anpassungsfähigkeit
F	Präzises, effektives und effizientes Arbeiten und Denken
G	Analytische Fähigkeiten zur Fehlerbehandlung und Qualitätssicherung
H	Bereitschaft und Eignung zum Erlernen neuer Technologien wie AR, MR und VR

Tabelle 3: Anforderungen an und Fähigkeiten eines Produktentwicklers

## Werkzeuge

In Kapitel 2.4.3 werden Beispiele für XR-CAD Anwendungen beschrieben. Dabei kommen Methoden und Techniken wie Virtual Reality und Hmds, Augmented Reality und Smartphones, CAVEs und Controller, sowie Mixed Reality samt MR-Brille und Gestensteuerung zum Einsatz. Die aufgezählten XR-Technologien erweitern und ersetzen sogar klassische Software bzw. Softwarefunktionen, durch Ressourceneinsparung. Traditionelle CAD-Systeme, zum Beispiel für 2D-Sketches oder 3D-Modelle sind jedoch nicht vollständig ersetzbar und weisen durch neue technologische Fortschritte und den technischen Wandel mehr und auch komplexere Funktionen auf [Vajna et al., 2018]. Der technische Wandel besteht prinzipiell aus zwei Ansätzen, die das klassische 3D CAD an Technologien wie XR anpassen oder schlichtweg traditionelle Software erweitern.

Der erste Ansatz, welcher auf 3D CAD basiert und dessen Funktionen erweitert ist 3D Direct Modeling oder auch history-free CAD genannt. Dabei können Produktentwickler Modelle direkt anpassen ohne den Verlauf der Modellierungen berücksichtigen oder verstehen zu müssen. Dadurch sind schnelle Änderungen ohne viel Hintergrundwissen möglich. Das Erlernen von 3D Direct Modeling ist vergleichbar mit 2D Modellierung und bedarf somit keiner Komplettumstellung.

Der zweite Ansatz sind sogenannte hybride CAD-Systeme. Dabei kann zwischen parametrischen Verfahren und direktem Modellieren wie bei 3D Direct Modeling gewechselt werden. Auch kann bei hybriden CAD-Systemen eingestellt werden, ob der Verlauf der unternommenen Anpassungen relevant ist und in Kontext genommen werden soll, oder nicht [Tornincasa et al., 2010; Vajna et al., 2018]. Ein Beispiel für ein Hybrid CAD-System ist das in Kapitel 2.3.5 in Abbildung 13 dargestellte SolidWorks. Die beschriebenen CAD-Systeme operieren auf Windows, Linux oder Mac OS-Systemen und kommen von namhaften Herstellern wie Siemens, Autodesk, Dassault Systemes oder PTC [Tornincasa et al., 2010].

Bedient werden hybride und direkte CAD-Systeme, gleich jedweder Art jedoch nicht nur über Gesten, Controller und Touch, sondern vor allem klassisch per Maus und Tastatur [Boritz und Booth, 1997; Wang et al., 2011]. Für die Steuerung von Objekten im Raum bspw. existieren jedoch auch spezielle Eingabegeräte wie 3D-Mäuse, wobei eine Art Kugel in verschiedene Richtungen gedreht, gekippt, gedrückt oder gezogen werden kann, um 3D-Eingaben oder eine Navigation im dreidimensionalen Raum zu realisieren [Wang et al., 2011; Tornincasa et al., 2010].

Eine beispielhafte Darstellung einer 3D-Maus ist in Abbildung 14 aufgeführt. Die aufgeführte Version ist die SpaceMouse Compact von 3dconnexion und explizit für CAD-Anwendungen entwickelt worden. Des Weiteren finden auch Trackpads und Touchscreens zunehmend Verwendung als Eingabegeräte für CAD. Dabei wird z.B. mit einem Finger eine Koordinateneingabe durchgeführt oder diverse Funktionen ausgeführt.



Abbildung 14: 3D Maus SpaceMouse von 3dconnexion<sup>5</sup>

Als Ausgabegerät wiederum dienen nicht nur Bildschirme, sondern u.a. auch Drucker, Scanner, Videoprojektoren und Zeichenmaschinen. Drucker geben z.B. Bilder, Tabellen und technische Zeichnungen in handelsüblichen Größen, Zeichenmaschinen über das DIN A3 Format aus [Vajna et al., 2018; Eigner und Stelzer, 2009]. Bei Druckern wird u.a. auch das Rapid Prototyping eingesetzt.

Rapid Prototyping ist ein Verfahren, womit 3D-Modelle aus CAx-Systemen effizient und aus kostengünstigen, formbaren Materialien in reale Prototypen umgewandelt werden können. Dadurch wird eine tastbare, erkennbare Darstellung eines Produktes ermöglicht, was beim Entwickeln und Optimieren eines Produktes helfen und den allgemeinen Entwicklungsprozess beschleunigen kann [Vajna et al., 2018]. Scanner hingegen erfassen bspw. Zeichnungen oder Fotografien und übersetzen die Grafiken je nach Anspruch an Qualität und Speicherplatzbedarf in verschiedene Bildformate, um die Grafiken anschließend durch Bildbearbeitungsprogramme weiter verarbeiten zu können [Eigner und Stelzer, 2009].

---

<sup>5</sup><https://3dconnexion.com/de/product/spacemouse-compact/> - Zugriff am 27.05.2021

## **Arbeitsplatz**

Neue, innovative und technische Fortschritte prägen das Arbeiten und damit auch den Arbeitsplatz. Virtual Reality, neue Bildschirmtechnologien, günstigere Hardware sind nur ein Auszug der zahlreichen Faktoren, die maßgebliche Auswirkungen auf den klassischen CAD-Arbeitsplatz von Produktentwicklern haben [Wolfartsberger, 2019; Vajna et al., 2018; Fiorentino et al., 2006; Eigner und Stelzer, 2009].

Ein CAx- bzw. CAD-Arbeitsplatz ist interaktiv und reagiert auf die Eingaben eines Produktentwicklers. Ein oder mehrere Bildschirme, die auch in unterschiedlichen Größen und Formaten vorkommen können jedoch bevorzugt gleichgroß sind, zieren den CAx-Arbeitsplatz. Die Bildschirme sind vorwiegend Flachbildschirme mit einer Bildschirmdiagonale von 23 (58 cm) bis 27 (68 cm) Zoll sowie einer Mindestauflösung von 1920 x 1200 Pixel, was je nach Anwendung und Designkontext variieren kann. Dadurch wird einem Produktentwickler ermöglicht, auf dem ersten Bildschirm bspw. Nahaufnahmen und auf dem zweiten Bildschirm die Gesamtansicht eines Modells anzuzeigen.

Zu den Eingabegeräten am CAx-Arbeitsplatz zählen vor allem klassische Eingabegeräte wie Maus und Tastatur. Speziell für CAD entworfene 3D-Mäuse kommen dann zum Einsatz, wenn z.B. die Navigation im dreidimensionalen Raum, das Modellieren von Geometrie oder u.a. auch Bildbearbeitung in CAx-Systemen übernommen werden soll [Vajna et al., 2018; Tornincasa et al., 2010]. Jedoch auch Touchscreens und Touchpads finden als Eingabegeräte Verwendung, da Touch eine intuitive Bedienung zulässt [Dorta et al., 2015; Vajna et al., 2018]. Die in 2.3.6 beschriebenen Ausgabegeräte wie Drucker und Scanner sind ebenfalls keine Ausnahme am CAx-Arbeitsplatz und bieten eine direkte Umwandlung der bearbeiteten Computermodelle in reale, greifbare Formen. Für die Kommunikation mit Kollegen oder das Arbeiten über Netzwerke hinweg, werden Lautsprecher, Mikrofone und Kameras eingesetzt. Dadurch wird auch das gemeinsame Entwickeln an einem einzigen Produkt realisiert [Vajna et al., 2018; Wolfartsberger, 2019].

### **2.3.7 Problematiken**

#### **Hardware und Interfaces**

Sowohl am CAx-Arbeitsplatz als auch beim konkreten Arbeiten mit CAx-Systemen, bestehen erhebliche Herausforderungen und Schwierigkeiten. Zu kleine Bildschirme bspw. führen zu zeitaufwendigem Skalieren der Bildschirmausschnitte und verhindern ein realistisches Größenbild eines Objektes auf einem Bildschirm [Vajna et al., 2018]. Auch komplexe und umständliche Systemkommandos zum Ausführen von Befehlen oder Funktionen in CAx-Systemen erschweren die Arbeit immens,

da die Vorgehensweisen nicht intuitiv sind. Gleichzeitig sind die komplexen Kommandos schwer einzuprägen, weshalb auf routinierte, bereits gelernte Techniken zurückgegriffen wird, statt neue, effizientere und effektivere, jedoch komplexere Techniken anzuwenden und zu erlernen [Tornincasa et al., 2010; Vajna et al., 2018].

Ein weiteres Problem beim Arbeiten mit CAx-Systemen sind GUIs und Feedback. UIs in CAx-Systemen strotzen von Informationen und Symbolen, wodurch die Oberflächen unübersichtlich werden und Platz einnehmen, der für Objektdarstellungen genutzt werden könnte. Geschachtelte Pull-Down und Pop-Up-Menüs sind das Resultat des Komprimierens von UIs in CAx-Systemen, was zu komplizierten Schaltungen für bestimmte Funktionen führt. Auch sind die Interfaces unter den CAx-Systemen nicht einheitlich, was zu aufwendigem Umdenken und etlichen Neuorientierungen führt [Vajna et al., 2018].

## **XR-Technologien**

Beim Arbeiten mit XR-Technologien wiederum wurde festgestellt, dass bspw. bei Verwendung von Hmds und MR kein Tiefengefühl existiert und Montageaufgaben dadurch behindert werden. Ebenfalls waren MR-Instruktionen über AR-Brillen aufgrund des geringen Sichtfeldes problematisch beim Einsatz von CAx-Aufgaben, weshalb neue Technologien wie die Microsoft HoloLens in 2.1.2 verwendet werden sollten [Fast-Berglund et al., 2018]. Auch beim Einsatz von Sprachsteuerung, z.B. um ein Objekt zu erzeugen, treten Komplikationen aufgrund Ungenauigkeit und komplizierter Menüverschachtelungen auf, weshalb Sprachsteuerung ungeeignet für komplexe CAx-Aufgaben ist, jedoch durch zukünftige technische Verbesserungen als potenzielles Instrument für schnellere Menünavigationen angesehen wird [Kou et al., 2010].

Des Weiteren wird VR im CAx-Kontext als kompliziert eingestuft, da VR zwar bspw. bei Darstellungen von Objekten aufgrund von realistischen Größendarstellungen unterstützend wirken kann [Eigner und Stelzer, 2009; Vajna et al., 2018; Andrade und Bastos, 2019], jedoch durch lang andauernde und ermüdende Gesten und Posen stark vom Kontext einer CAx-Aufgabe abhängt [Fiorentino et al., 2006; Andrade und Bastos, 2019].

## **Feedback**

Bezüglich des Feedbacks haben bspw. Millette und McGuffin [2017] sowie Wang et al. [2011] herausgefunden, dass visuelles Feedback als angenehmste und natürlicheste Form bei CAx-Aufgaben angesehen wird wohingegen auf haptisches Feedback bei VR oder AR-Einsatz im CAx-Kontext, hinsichtlich unzureichender Präzision und eingeschränkter Umsetzung verzichtet werden sollte.

Klare, hervorgehobene Markierungen oder Umrandungen sind somit zu bevorzugen [Wang et al., 2011]. Audiosignale können visuelles Feedback unterstützen, sollten jedoch nicht alleinstehend eingesetzt werden [Fiorentino et al., 2006]. Eine Kombination aus visuellem und auditivem Feedback führt nach Zhang et al. [2005] zu einer besseren Performance bei Produkt-Entwicklungsschritten wie Montageaufgaben, als separat eingesetzte Feedbackformen.

### **Tragbare Geräte**

Ebenfalls sind tragbare Eingabegeräte wie Handschuhe, bzw. Markierungen an Fingern für CAD-Aufgaben ungeeignet, da Trackingmechanismen aufgrund der standardmäßig geringen Anzahl an erkennbaren Gesten nur unzureichend die Palette an Funktionen einer CAx-Umgebung abbilden [Manresa et al., 2005]. Beim Einsatz von On-skin Interfaces für CAD-Aufgaben muss zusätzlich beachtet werden, dass keine gefährlichen Utensilien oder Materialien eingesetzt werden, sodass ein Nutzer keine Schäden davon trägt.

Hinzukommend sind tragbare Geräte, bzw. Handhelds auf die jeweiligen Aufgaben abzustimmen, was mit erhöhtem Aufwand verbunden ist, da sonst angesichts der menschlichen Anatomie, unbequeme Positionen eingenommen werden müssen, oder bestimmte Körperregionen schwierig zu erreichen und Funktionen dadurch unmöglich auszuführen sind und auch der Komfort beim Arbeiten verringert wird [Gannon et al., 2016]. In Anbetracht der aufgeführten Problematiken ist sowohl die Wahl der verwendeten Systeme und Technologien, als auch die Präsentation von Interface und Feedback entscheidende Faktoren für den Erfolg von CAx-Systemen und modernen CAx-Arbeitsplätzen.

## 2.4 Verwandte Arbeiten

In diesem Kapitel werden u.a. jeweils zwei Arbeiten vorgestellt, die Bezug auf die vorangegangenen Definitionen zu aktiven oder passiven Sensoren aus Kapitel 2.2.3 aufweisen als auch relevant für den Anwendungsfall dieser Arbeit sind, sowie vier Projekte vorgestellt, die Technologien und Themen aus den Disziplinen AR, MR und VR im Bereich CAD zur Anwendung gebracht und erforscht haben. Bei den Arbeiten mit aktiven und passiven Sensoren wird explizit auch auf die eingesetzten Gerätschaften und Praktiken eingegangen, wodurch die Systeme erst aktiv oder passiv kategorisiert werden können. Die eruierten Informationen sind auch ein wesentlicher Teil im für diese Arbeit relevanten Rahmen der Konzeption und Entwicklung des zu entwickelnden Prototypen.

### 2.4.1 Active On-body User Interfaces

#### Sixth Sense

Das von Mistry und Maes [2009] entwickelte System SixthSense beschreibt ein tragbares Interface, welches am eigenen Körper aufgebaut und befestigt wird, um die reale Umgebung zu erweitern. Zum Einsatz kommen dabei ein auf dem Kopf oder auf einem Hut befestigter Projektor, sowie eine Kamera und Farbmarkierungen an den Fingern. Informationen wie Karten, Bilder oder Werkzeuge wie eine Uhr können u.a. auf Wände, Tische oder die eigene Haut projiziert werden. Durch die Farbmarkierungen an den Fingern, können Gesten oder simple Interaktionen wie Knopfdrücke abgebildet und eingesetzt werden. Die Tiefeninformationen der Kamera und des Projektors helfen bei der Kalibrierung der 3D-Daten. Abbildung 15 zeigt den prototypischen Aufbau des SixthSense Systems.

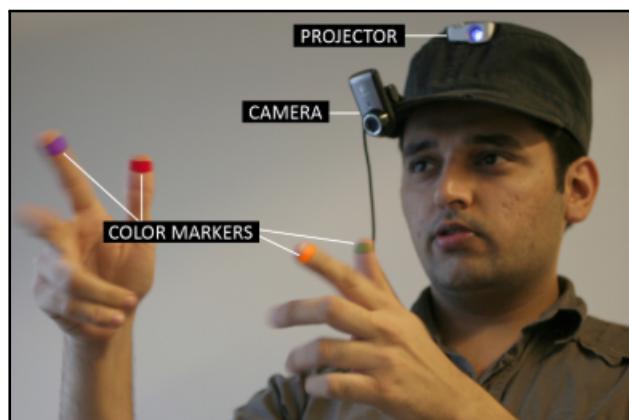


Abbildung 15: SixthSense System  
[Mistry und Maes, 2009]

## OmniTouch

So wie SixthSense [Mistry und Maes, 2009] verwendet das System OmniTouch einen Projektor und eine Kamera, kommt jedoch ohne Farbmarkierungen aus [Harrison und Wilson, 2011]. Im Vergleich zu SixthSense wird das System ausschließlich an der Schulter und nicht am Kopf platziert. Auch der Projektor ist ein anderer. Zum Einsatz kommt ein Pico-Projektor, welcher Weitwinkel und fokusfreie Projektionen erlaubt und damit grafische Elemente oder Interfaces allgemein unabhängig von Tiefe darstellen kann. Ein weiterer Unterschied zu SixthSense [Mistry und Maes, 2009] ist, dass das OmniTouch-System sowohl Berührungen als auch Schwebbewegungen erfassen kann, wodurch weitaus mehr Funktionen möglich sind. Vorausgesetzt wird jedoch, dass die Finger stets ausgestreckt sind, da sonst keine zuverlässige Erkennung stattfindet. Der exemplarische Einsatz des OmniTouch-Systems kann Abbildung 16 entnommen werden.

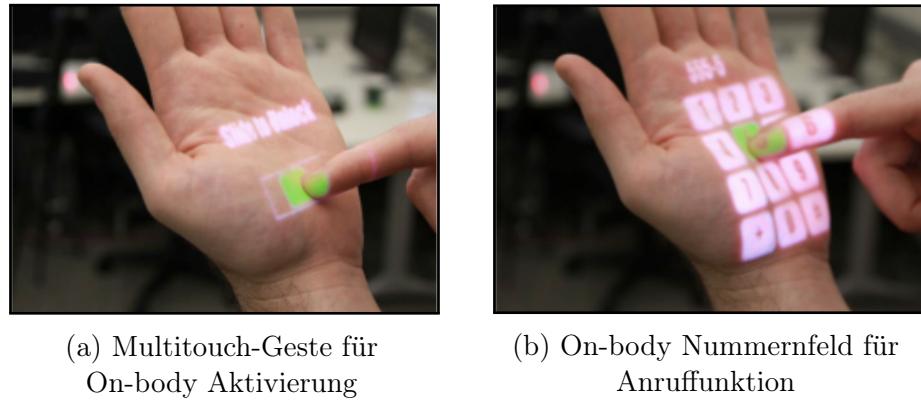


Abbildung 16: Verwendung des OmniTouch Systems  
[Harrison und Wilson, 2011]

### 2.4.2 Passive On-body User Interfaces

#### PalmRC

Das System von Dezfuli und Müller [2012] fungiert als “imaginary user interface”. Darunter wird ein Interface verstanden, welches von einem Nutzer nicht eingesehen werden kann, jedoch volle Funktionalität aufweist. Eingesetzt wird PalmRC zur Steuerung von Fernsehern, genauer als menschliche Fernbedienung. Eine Kamera erfasst die Position der Hände und Finger und leitet daraus ab, welche Funktion ausgeführt werden soll.

Wichtig bei der Verwendung des PalmRC Interface ist demnach, die Vorstellungskraft für ein Interface, welches diverse Funktionen auf den Handflächen darstellt. Vorteilhaft ist dabei vor allem die Unabhängigkeit von externen Gerätschaften als auch der ausschließliche Einsatz einer Kamera. Wie das PalmRC-System verwendet wird, ist in Abbildung 17 abgebildet.



Abbildung 17: PalmRC System  
[Dezfuli und Müller, 2012]

LightSpace

Ein weiteres Beispiel für die Projektion von virtuellen Elementen in die reale Umgebung ist das Projekt LightSpace von Wilson und Benko [2010]. LightSpace kombiniert wie OmniTouch [Harrison und Wilson, 2011] und SixthSense [Mistry und Maes, 2009] eine Kamera und einen Projektor, um durch Tiefenwahrnehmung einen Nutzer sowie die Hände und weitere Objekte im dreidimensionalen Raum zu erkennen. Befestigt wird das LightSpace-System hingegen der beiden anderen Systeme über dem Nutzer. Nach der Kalibrierung der Kamera- und Projektordaten ist es möglich, Interfaces sowie Objekte auf allerlei Oberflächen und auch in unterschiedlichen Höhen zu projizieren. Die projizierten Inhalte können anschließend durch Handgesten und Touch-Eingaben nach Belieben manipuliert werden. Die Verwendung des LightSpace-Systems ist in Abbildung 18 dargestellt.



Abbildung 18: Einsatzmöglichkeiten des LightSpace Systems  
[Wilson und Benko, 2010]

### 2.4.3 Cross Reality Computer-aided Design User Interfaces

Wie bereits in Kapitel 2.1.2 beschrieben, sind XR-Anwendungen dadurch gekennzeichnet, Elemente aus AR, MR und VR zu kombinieren, um dadurch die reale Welt zu erweitern bzw. neue Realitäten herzustellen. Virtuelle Elemente können dabei bspw. auf reale Objekte gelegt, oder reale Objekte in virtuelle Welten integriert und dort bearbeitet werden [Fast-Berglund et al., 2018]. XR User Interfaces (XRUIs) sind folglich dadurch definiert, mit welchen Eingabe- und Ausgabegeräten bzw. Techniken gearbeitet, als auch in welchem Maß die reale Welt erweitert oder eine virtuelle Welt realisiert wird.

Moderne MR-Brillen wie die Nreal Light oder Microsoft's HoloLens sowie auch bereits etablierte Technologien wie CAVEs bringen das Gefühl von erweiterten Realitäten in verschiedenen Kontexten in die Industrie [Xu, 2021; Taylor, 2016; Tornincasa et al., 2010] und zunehmend in die Gesellschaft [Speicher et al., 2019]. Vor allem auch im Bereich der computergestützten Grafik- und Modellbearbeitung im Sinne von CAD erweitern neue Ansätze die Arbeit von Designern und Architekten [Weidlich et al., 2007; Millette und McGuffin, 2017; Newnham et al., 2018].

Nachfolgend werden vier Arbeiten beschrieben, welche ein System mit verschiedensten XR-Formen entwickelt haben, um mit CAD-Tools zu arbeiten oder CAD-Ansätze zu realisieren. Dabei soll ein grober Überblick über die Möglichkeiten abseits von On-body bzw. On-skin-Lösungen für XR-Anwendungen in Bezug auf CAD vermittelt werden. Die aufgeführten Informationen zu den erläuterten Arbeiten dienen der Ergänzung von Anforderungen an ein Cross Reality User Interface (XRUI) für den Einsatz in CAD im Entwicklungsteil dieser Arbeit.

#### Virtual Reality CAD

In Wolfartsberger [2019] wurde ein System entwickelt, mit welchem 3D-Modelle in VR begutachtet, auseinandergebaut und wieder zusammengebaut werden können. Eingesetzt wird dabei eine HTC Vive VR-Brille als Ausgabegerät sowie Vive Controller zur Interaktion mit der Anwendung. Mögliche Interaktionen sind u.a.:

- Laufen
- Greifen, Selektieren
- Berühren
- Separieren und Zusammenführen
- Verstecken und Anzeigen

Zurückgegriffen wurde dabei auf haptisches Feedback wie Vibrationen sowie auf visuelle Hinweise in Form von Texten und aufleuchtenden Markierungen. Das Interface beinhaltet außerdem diverse Buttons um Funktionen auszuwählen wie z.B. das Teleportieren der eigenen Figur. Die exemplarische Verwendung ist in Abbildung 19 dargestellt.

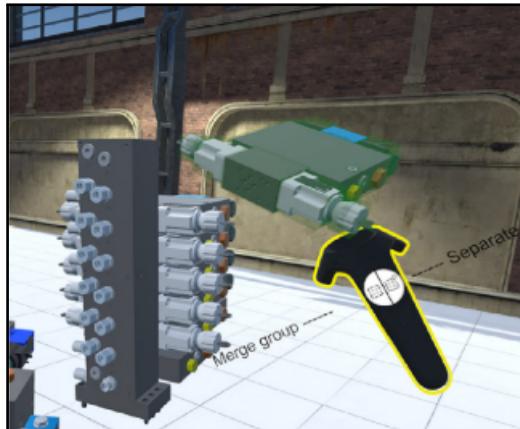
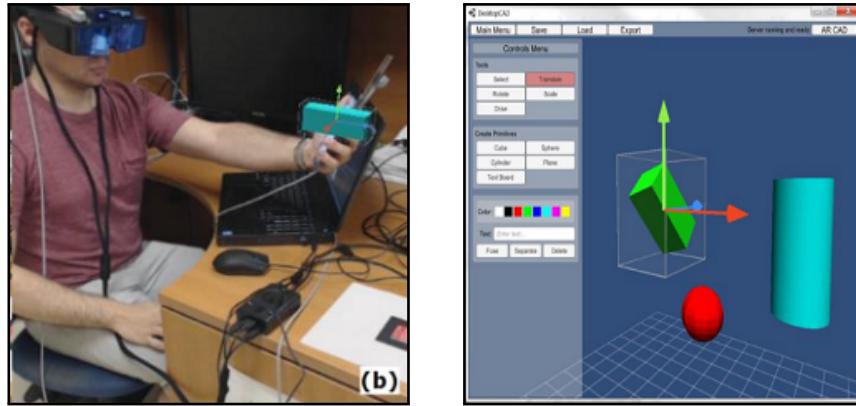


Abbildung 19: VRSmart CAD System  
[Wolfartsberger, 2019]

Eine Studie mit 16 Testpersonen, welche nach Fertigstellung des beschriebenen Systems durchgeführt wurde ergab, dass mithilfe eines VR Interfaces in CAD, bei geeigneter Implementierung mehr Fehler in 3D-Modellen gefunden werden konnten als bei Verwendung einer reinen 2D-Desktoplösung. Ebenfalls wurden die Interaktionen z.B. das direkte Greifen von Objekten mit den Controllern als angenehm empfunden.

## Augmented Reality CAD

Das System von Millette und McGuffin [2017] beschreibt das Anfertigen von 3D-Modellen anhand eines Hmd sowie einem Mobilgerät in Form eines Smartphones. Das tragbare Hmd ist dabei durchsichtig und dient als AR-Brille, während das Smartphone als Eingabegerät fungiert. Ein Benutzer des Systems kann auf der Oberfläche des eingesetzten Smartphones zeichnen, Objekte selektieren und zusammenfügen. Die AR-Brille ermöglicht anschließend die 3D-Visualisierung der gezeichneten Objekte. Die Verwendung des Systems ist Abbildung 20 zu entnehmen.



(a) DualCAD Einsatz der AR-Brille und Smartphone

(b) DualCAD Einsatz der 2D-Anwendung

Abbildung 20: Verwendung des DualCAD Systems  
[Millette und McGuffin, 2017]

Eine zusätzliche 2D-Anwendung ermöglicht einen reibungslosen Wechsel zwischen 2D und 3D, ohne das Hmd abnehmen zu müssen. Bedienelemente wie Buttons und Textfelder auf dem Smartphone und in der 2D-Anwendung helfen bei der Koordination zwischen 2D und 3D. Als Feedback kamen Farbmarkierungen wie in Wolfartsberger [2019] zum Einsatz. Das System wurde mit fünf Personen getestet und ergab, dass der Einsatz von AR als wertvoll einzustufen sei.

Ein weiterer Ansatz CAD mit XR-Technologien zu kombinieren wird in [Tornincasa et al., 2010] beschrieben. Dabei wird ein CAVE wie in 2.1.2 eingesetzt, um über 3D-Bildschirmtechnologien und den Einsatz einer AR-Brille sowie einem Controller 3D-Modelle im Raum darzustellen. Projektoren an den Wänden, Decke und Boden projizieren die 3D-Modelle in den Raum und erfassen über Tracking-Sensoren die Bewegungen einer Person. Über Buttons können die angezeigten Modelle gedreht und skaliert werden, um Details ausfindig zu machen oder mit weiteren Personen im Raum kollaborativ zu arbeiten. Das beschriebene CAVE-System ist in Abbildung 21 dargestellt.



Abbildung 21: CAVE System für CAD-Einsatz  
[Tornincasa et al., 2010]

## Mixed Reality CAD

Mixed Reality ist ebenfalls im Bereich von CAD vertreten und findet u.a. Anwendung in der Architektur genauer im Produktlebenszyklus [Ren et al., 2016], bei Montageaufgaben [Funk et al., 2017] oder bei der Modellierung von Skulpturen aus Stahl [Newnham et al., 2018]. Im System von Newnham et al. [2018] kommt sowohl eine Microsoft HoloLens MR-Brille sowie eine 3D CAD-Anwendung zum Einsatz. Um die holografischen Elemente auf die HoloLens Brille zu übertragen, wurde eine Pipeline entwickelt, die 2D-Informationen aus der Anwendung in 3D-Informationen umwandelt und über ein MR Interface darstellt. Ein stetiger Austausch zwischen Desktop-Arbeiter und Brillenträger wurde dadurch realisiert und sorgte für einen Echtzeitaustausch an Daten. Die in einer HoloLens verbauten Sensoren, Kameras und Beschleunigungsmesser erfassen die vom Brillenträger durchgeführten Handgesten, und kalibrieren den Blick und die Position passend zur Umgebung. Durch holografische Buttons und diverse textuelle Informationen kann der Träger der HoloLens MR-Brille, Teile der in 2D erstellten Modelle einsehen, biegen, drehen, iterativ begutachten, skalieren, nachbearbeiten und überprüfen. Die Verwendung des MR-CAD Systems kann in Abbildung 22 eingesehen werden.

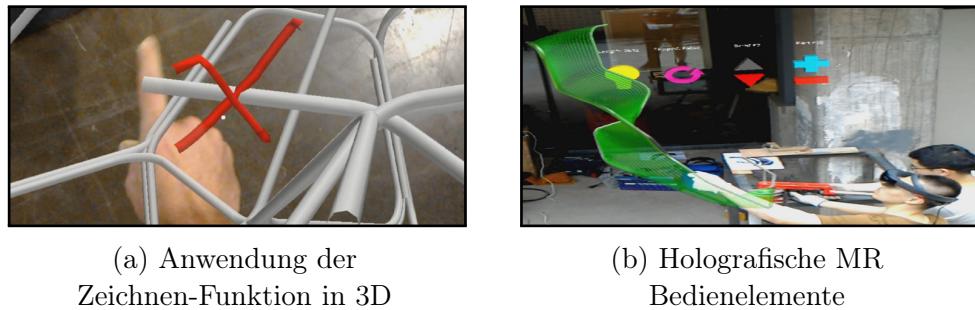


Abbildung 22: Einsatz des MR-CAD Systems  
[Newnham et al., 2018]

Bei der Arbeit von Newnham et al. [2018] wurde dabei festgestellt, dass die Aufgaben schneller, kostengünstiger, fehlerfreier und ohne Vorkenntnisse erledigt werden konnten, aufgrund dessen, dass keine CNC Robotertechnik eingesetzt und im Vergleich lediglich leichte Ausrüstung benötigt wurde, die keiner langfristigen Ausbildung bedurfte.

## 3 Hauptteil

### 3.1 Hinführung zum Konzept

Um ein XR Interface für CAD-Anwendungen mithilfe von Augmented Reality zu entwickeln, welches zugleich benutzerfreundlich und für Produktentwickler geeignet ist, bedarf es diverser Leitsätze, Prinzipien und Richtlinien. Die daraus resultierenden Anforderungen können in Teilespekte separiert und zusammengefasst werden. Alle Richtlinien eines Teilespektes werden letztendlich tabellarisch zusammengeführt, um eine klarere Referenzierung zu ermöglichen. Im Rahmen dieser Arbeit fallen die Aspekte unterschiedlich anspruchsvoll aus. Nachfolgend werden Ansätze, Empfehlungen, Leitsätze und Richtlinien aus Disziplinen wie UX und Usability einerseits durch Erkenntnisse und Fakten aus Kapitel 2 und andererseits durch diverse weitere vorangegangene Arbeiten und Studien wie auch in Kapitel 2.4 aufgeführt beschrieben. Danach folgt eine Eingrenzung, um einen Zuschnitt zum Kontext dieser Arbeit herzustellen. Die entstandenen Kriterien fließen sowohl in die Konzeption als auch in die technische Umsetzung des Prototypen ein.

#### 3.1.1 Leitsätze und Prinzipien

##### Richtlinien für Usability

Wie bereits in Kapitel 2.1.4 erwähnt, bezieht sich Usability vorwiegend auf die Benutzerfreundlichkeit, was u.a. die Bedienbarkeit eines Produktes betrifft. Benutzerfreundlich ist ein Produkt dann, wenn es einem Nutzer hilft, selbst gesteckte Aufgaben und Ziele effektiv, effizient und zufriedenstellend zu erreichen [Richter und Flückiger, 2016]. Damit ein Produkt das schafft, müssen jedoch gewisse Voraussetzungen erfüllt sein. Zum Beispiel muss der Nutzer als Zielgruppe bekannt sein, damit dessen Kontext und Ansprüche vollständig erfasst und ein Produkt darauf angefertigt werden kann. Das Contextual Inquiry (s. 2.1.4) hilft dabei, relevante Informationen zu erfassen und für die Entwicklung eines Produktes aufzubereiten. Die persönlichen Eigenschaften, besonders die physischen wie Größe oder die Funktionalität beider Hände, haben einen wesentlichen Einfluss auf die Bedienung eines Produktes [Galitz, 2007]. Dazu gehören vor allem ergonomische Faktoren. Eine komfortable und dennoch effektive Präsentation eines Produktes fördert nicht nur die Bedienbarkeit, sondern auch das emotionale Empfinden eines Nutzers über ein Produkt, worauf im hieran anknüpfenden Abschnitt noch genauer eingegangen wird. Jedoch auch Produkteigenschaften wie Material und Textur beeinflussen die Wahrnehmung eines Produktes und wie damit umgegangen wird.

Speziell beim Entwickeln von Interfaces, welche sich auf dem eigenen Körper oder freischwebend im Raum befinden, gelten besondere Richtlinien, um ein hohes Maß an Usability zu gewährleisten. Negativeffekte wie Frust, Wut, hohe Fehlerraten oder Verletzungen und Schäden sollen damit verhindert werden [Norman, 2008]. Beispielsweise begünstigen zu hohe oder zu weit entfernte Interfaces und auch Gesten die Ermüdung der Arme, woraufhin die Interface-Bedienung ausfällt und generell die Performance eines Nutzers eingeschränkt wird [LaViola et al., 2004]. Das sogenannte Gorilla Arm Syndrom (s. 2.1.3) ist stets durch bequeme und komfortable Gesten und Posen zu vermeiden [Riecke et al., 2018]. Bereits eine fünf Zentimeter zu hohe Interaktion-Positionierung führt nach 20 Minuten zur Ermüdung der Arme, wie in Abbildung 23 dargestellt [Alger, 2015; LaViola et al., 2004].

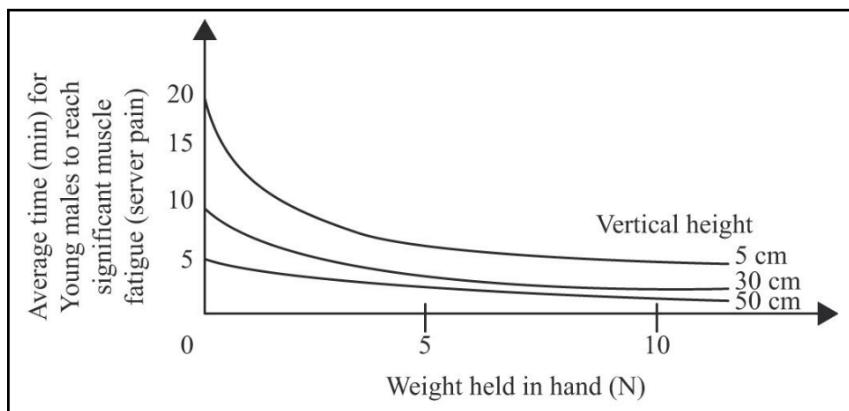


Abbildung 23: Korrelation zwischen Dauer und Position  
bezogen auf Arm-Ermüdung  
[LaViola et al., 2004]

Grundlegend sollte die No-No Zone berücksichtigt werden, damit ein Interface funktional und komfortabel positioniert wird. Ein Abstand von 50 Zentimeter zum eigenen Körper im Falle von UI-Elementen ist mindestens einzuhalten [Alger, 2015]. Dazu können auch zu kleine oder nicht komfortabel positionierte UI-Elemente eine negative Usability begünstigen [Schaer und Thum, 2007]. Die körperfixierte Darstellung bietet sowohl positive als auch negative Aspekte zur Usability. So wurde in [Harrison und Faste, 2014] bspw. herausgefunden, dass Interfaces auf den Beinen oder auf den Schultern und dem Rücken nicht für Interaktionen geeignet sind. Generell wurden sogar Unterschiede zwischen Frauen und Männern in der Wahl eines Interfaces und dementsprechenden Interaktionen festgestellt, weshalb die empfundene Usability auch von persönlichen Eigenschaften abhängt.

Explizit kann jedoch die Bevorzugung von Interfaces auf Unterarm und Hand festgehalten werden, da die Interaktionen somit problemlos unterhalb der Augenhöhe stattfinden und demzufolge Interaktionen je nach Kontext ergonomisch akzeptabel ablaufen können [Harrison et al., 2012, 2011; Dezfuli und Müller, 2012; Harrison und Faste, 2014]. Ein nach unten gerichteter Blickwinkel von 15 bis maximal 50 Grad sollte dabei unter der Berücksichtigung der 50 Zentimeter entfernten Platzierung von UI-Elementen bei Touch-Interfaces wie in Abbildung 24 eingehalten werden [Alger, 2015].

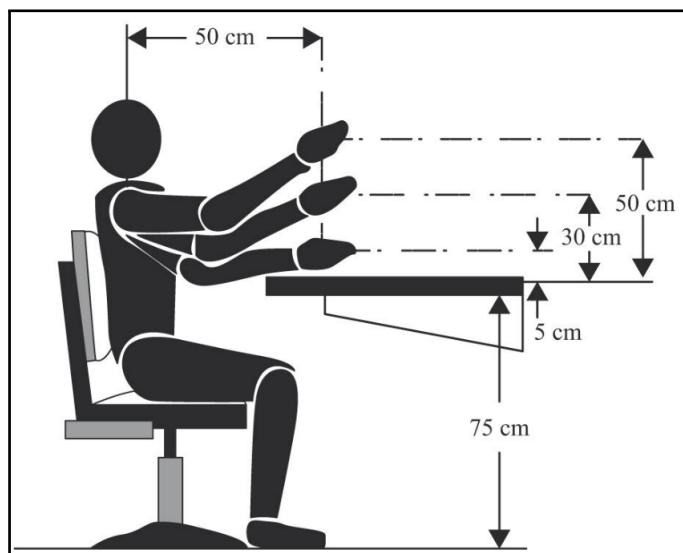


Abbildung 24: Muskelmüdigkeit begünstigende Arbeitshaltung am Schreibtisch  
[LaViola et al., 2004]

Ein Auftreten von weiteren Nebeneffekten wie Motion Sickness bspw. kann aufgrund von zu schwacher Hardware oder dem Einsatz von unpassenden Ausgabegeräten zu einer niedrigen Usability führen und die Arbeit nicht nur behindern, sondern auch unterbrechen. Eine gute Wahl der Technologien ist demnach einflussgebend, um zielgruppengerechte Interaktionen und eine positive Usability zu fördern [Vajna et al., 2018]. Des Weiteren sind grundlegende psychische Aspekte sowie eine Strukturierung nach dem Keep It Small and Simple (KISS)-Prinzip einzubeziehen. Nach [Nielsen und Molich, 1990] sind dafür die nachfolgenden Aspekte entscheidend:

- Simple and natural dialogue
- Speak the user's language
- Minimize user memory load
- Be consistent
- Provide feedback
- Provide clearly marked exits
- Provide shortcuts
- Good error messages
- Prevent errors

Soweit möglich sind Anwendungen demnach einfach zu halten, sowohl in Funktion als auch in Handhabung und Ästhetik. Konsistenz, Feedback und Fehlervermeidung tragen nicht unwe sentlich zu besserer Usability bei. Funktionalität und bedeutsamer Inhalt steht bei Usability jedoch an erster Stelle und ist durch entsprechende Hardware und Richtlinien bevorzugt herzustellen [Wetzel et al., 2008]. Tragbare Geräte wie Gürtel [Harrison et al., 2011] oder Handschuhe [Wang et al., 2011] weisen zwar interessante und unterschiedliche Funktionsweisen sowie Handhabungen auf, im Falle von Anwendungen im CAD sind jedoch freihändige Interfaces in Betrachtung von XR zu bevorzugen, da somit ein Produktentwickler beide Hände zum Bedienen von UI-Elementen oder zum Modellieren frei hat und keine zusätzliche Komplexität durch externe Gerätschaften entsteht [Dezfuli und Müller, 2012; Wang et al., 2011]. Die Anforderungen aus der Rubrik Usability sind stichpunktartig Tabelle 4 zu entnehmen.

A	Bedürfnisse und Fähigkeiten der Zielgruppe berücksichtigen
B	Menschliche Anatomie für Bedienbarkeit von On-body UI beachten
C	Ergonomische Faktoren miteinbeziehen wie z.B. Interface-Abstand zum eigenen Körper mindestens 50 cm Interface-Position zwischen 15 und 50 Grad unter Augenhöhe Interface auf Unterarm oder Hand platzieren
D	Grundlegende Prinzipien wie KISS verfolgen
E	Keine tragbaren Gerätschaften für längere Aufgaben verwenden
F	Feedback, Fehlerbehandlung und -vermeidung in Betracht ziehen

Tabelle 4: Richtlinien zum Aspekt Usability

### Richtlinien für User Experience

UX ist wie in Kapitel 2.1.5 beschrieben, ein dynamischer Prozess, der einerseits von der Präsentation eines Produktes, andererseits von den physischen und psychischen Zuständen eines Nutzers vor, während und nach der Benutzung eines Produktes abhängt. Jeder Mensch nimmt anders wahr, wodurch Erfahrungen im gleichen Kontext ganz unterschiedlich entstehen können. Darum ist ein gewisses Verständnis der Zielgruppe im Prozess der Gestaltung eines Produktes hilfreich. Unter das dabei unterstützende Contextual Inquiry (s. 2.1.4) fällt bspw. die Eigenschaften der Zielgruppe oder Zielperson zu erfahren, darunter z.B. das Alter, Vorlieben, Ängste oder Vorkenntnisse, um ein Produkt auf die gesammelten Bedürfnisse anpassen zu können [Richter und Flückiger, 2016; Galitz, 2007; LaViola et al., 2004].

Auch Personas oder Szenarien können durch skizzenhafte Darstellung eines Nutzers bzw. eines Anwendungsfalles, die Konkretisierung eines Produktes konstruktiv unterstützen. Psychologische Empfindungen wie Konfusion, Verärgerung, Stress oder Langeweile können das Resultat eines unklaren, nicht intuitiven, inkonsistenten oder auch komplizierten Interfaces bzw. Produktes sein, welches für eine Zielgruppe unzureichend entwickelt wurde [Galitz, 2007; Vajna et al., 2018; Kosmadoudi et al., 2013]. Um intuitiv und klar zu wirken, sollte ein Produkt bspw. den mentalen Modellen eines Menschen entsprechen und die Erwartungen dessen erfüllen. Dabei ist es vorteilhaft für Anfänger und Experten dementsprechende Anpassungen vorzunehmen, sodass die Erwartungen den Erfahrungen eines Nutzers entsprechend erfüllt werden können.

Durch intuitive Interfaces kann mitunter auch die Lernkurve minimiert und simplere Anweisungen gegeben werden, wovon auch die Präsentation eines Interfaces profitiert. Bekannte Symbole und Funktionsweisen unterstützen die Erfüllung der Erwartungen erheblich und wirken sich positiv auf die UX aus [Dünser et al., 2007]. Auch Fehlerbehandlungen oder Fehlervermeidung sind beachtenswerte Faktoren, um negative Gefühle zu verhindern und die Produktivität eines Nutzers aufrechtzuerhalten [Al-wabil et al., 2007; Galitz, 2007]. Die Ästhetik ist ebenso wie die Funktionalität eines Produktes ein wesentlicher Faktor, welcher Auswirkungen auf die UX eines Nutzers hat. Deshalb sollten auch folgende Aspekte, bei der Konzeption des On-body Interface berücksichtigt werden:

- Emotionale Wirkung des Produktes
- Bildsprache und Symbolik
- Farben und Kontraste
- Textgestaltung und Schriften
- Anordnung und Abstände der Elemente
- Animationen und flüssige Übergänge
- Form, Wirkung und Haptik physischer Bedienelemente

Aufgrund der On-body Eigenschaft des zu entwickelnden Interfaces besteht bereits eine gewisse emotionale Wirkung auf einen Nutzer. Symbole, Anordnungen, Animationen und Form sind durch die Positionierung auf dem eigenen Körper eines Nutzers begrenzt anpassbar [Schaer und Thum, 2007].

Zu kleine Formen oder zu eng beieinander liegende Elemente eines Interfaces, sind nach Fitts' Gesetz defizitär für die Beziehung zwischen Genauigkeit, Geschwindigkeit und Performance von Auswahlprozessen, da diverse Abstandsregeln und Größenverhältnisse eingehalten werden sollten, um eine positive UX herbeizuführen [Fitts, 1954]. Darum ist die Entscheidung über das Design und die Position des On-body Interface ein essentieller Faktor, für den späteren Einsatz in realistischen Anwendungsfällen.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Latenz zwischen Aktion eines Nutzers und Reaktion eines Systems. Eine Latenz, welche für einen speziellen Anwendungsfall nicht mehr angemessen ist, wirkt sich negativ auf die Performance und somit auch auf die UX eines Nutzers aus. Menschen sind in der Lage Latenz zu einem gewissen Grad zu kompensieren, empfinden Latenz an sich jedoch als negativ, unabhängig davon ob es sich wie in Kapitel 2.1.6 beschrieben um zeitliche oder räumliche Latenzen handelt [Coquillart et al., 2011; LaViola et al., 2004].

Auch Schwankungen in der Genauigkeit von Sensoren oder Systemen sowie ein bestimmtes Maß an Rauschen, sprich Fehl- oder Falschinformationen von Sensoren, haben Einfluss auf die subjektive UX eines Nutzers und sollten durch eine abgestimmte Auswahl an Technologien vermieden werden [Pavlovych und Stuerzlinger, 2009; Teather et al., 2009]. Die aufgeführten Aspekte sind in Tabelle 5 stichwortartig zusammengefasst und werden bei der Konzeption und Entwicklung des Prototypen berücksichtigt.

A	Anforderungen und Eigenschaften der Zielgruppe berücksichtigen
B	Erwartungshaltung der Zielgruppe durch Konsistenz erfüllen
C	Ästhetische und thematische Faktoren wie Symbole und Bezeichnungen der Zielgruppe miteinbeziehen
D	Gestaltungsgesetze für Form und Position beachten darunter z.B. Fitts Gesetz für Genauigkeit und Geschwindigkeit
E	Latenzen durch bedachte Auswahl der Technologien gering halten
F	Natürliches Fehlerverhalten von Nutzern einschließen und negative Gefühle wie Frust durch Einschränkungen vermeiden

Tabelle 5: Richtlinien zum Aspekt User Experience

## **Feedback Richtlinien**

Feedback hilft einem Nutzer den Zustand eines Systems zu verstehen, sowie die Ergebnisse einer Aktion oder den Status einer Aufgabe nachvollziehen zu können [LaViola et al., 2004]. Wichtig dabei ist wie in Kapitel 2.1.6 die Übereinstimmung der Szenerie mit dem Feedback, sprich das was passiert, muss dem entsprechen was ein Nutzer getan hat. Die directional, spatial sowie die temporal compliance also räumliche und zeitliche Übereinstimmung von Aktion und Reaktion müssen übereinstimmen [Riecke et al., 2018; LaViola et al., 2004]. Gerade bei Aufgaben wie Selektion von Funktionen oder Objekten ist ein Feedback angebracht und auch notwendig. Eine Selektion bspw. lässt sich in drei Schritte unterteilen. Erstens die Andeutung des Objektes, sprich das Anwählen oder Anvisieren eines Objektes, zweitens die bestätigte Auswahl des Objektes, sowie drittens die Rückmeldung über die Selektion. Ein Feedback über die erfolgreiche oder fehlgeschlagene Selektion ist dabei unverzichtbar [Schaer und Thum, 2007].

Sowohl bei Selektionen als auch bei anderen Manipulationstechniken ist Feedback bevorzugt visueller Natur. Farben, Rahmen, Skalierungen, Unschärfe-Effekte oder Helligkeitsveränderungen werden als visuelles Feedback sowohl allgemein als auch explizit in CAD-Umgebungen und On-body UI Kontexten eingesetzt [Tenmoku et al., 2005; LaViola et al., 2004; Norman, 2008; Harrison et al., 2012; Wang et al., 2011; LaViola Jr, 2014]. In Wang et al. [2011] bspw. wird visuelles Feedback verwendet, wenn eine Manipulation z.B. eine Selektion eines Objektes möglich ist. Wiederum in Riecke et al. [2018] wird visuelles Feedback bevorzugt für Interfaces eingesetzt, die durch Gesten und Tracking-Mechanismen bedient werden. In der Arbeit von Gannon et al. [2016] wurde visuelles Feedback nicht nur unterstützend, sondern generell als Funktion für das entwickelnde Interface an sich verwendet, um die Genauigkeit der Interaktionen zu erhöhen und eine Feinabstimmung zwischen Projektor und Sensoren zu ermöglichen.

Einem Nutzer sollte schließlich zu jeder Zeit klar sein, welche Auswirkungen welche Aktion hervorbringt. Unterstützend kann dabei auch auditives oder haptisches Feedback verwendet werden. Jedoch ist auditives oder haptisches Feedback als alleinstehendes Merkmal im Vergleich zu visuellem Feedback nicht in dem gleichen Ausmaß für Manipulationsaufgaben oder Interfaces geeignet, da der Nährwert an visuellen Informationen denen eines Audiosignals oder bspw. einer Vibration überlegen ist [Burdea, 1996; LaViola Jr, 2014; Weigel et al., 2014]. Im Falle von Interfaces oder Interaktionen, welche direkt auf oder mit dem eigenen Körper stattfinden, kann sogar auf zusätzliches haptisches Feedback aufgrund dem bereits vorhandenen Empfindungsvermögen für den eigenen Körper verzichtet werden.

Ebenfalls kann bei einem Hand-Interface bspw. auf visuelles Feedback je nach Kontext verzichtet werden, da die eigenen Hände von vornherein gewisse feste Ankerpunkte wie Fingerspitzen und Handfläche, als auch Bezeichnungen wie Ringfinger oder Zeigefinger besitzen, wodurch eine genaue Zuordnung von Positionen für z.B. UI-Elemente realisiert werden kann [Dezfuli und Müller, 2012; Weigel et al., 2014; Harrison et al., 2011]. Dadurch kann z.B. auch der Prozess der Feedback-Implementation vereinfacht werden.

Bei ausschließlich visuellem Feedback sollte jedoch die Präsentation dessen stets berücksichtigt werden. Zum Beispiel welche Farben werden verwendet, die Größe von Anzeigetexten oder die Dicke eines Rahmens sind angemessen zu implementieren, um weder zu aufdringlich noch zu unscheinbar zu wirken [Schaer und Thum, 2007]. Aus den genannten Informationen lässt sich eine klare Tendenz zum Aspekt Feedback für die Entwicklung eines On-body CAD Interfaces mithilfe von AR feststellen, welche in Tabelle 6 festgehalten wird.

A	Formen der Feedback compliance berücksichtigen
B	Feedback zu jeder Aktion eines Nutzers geben
C	Visuelles Feedback dem auditiven Feedback vorziehen auditives Feedback als Unterstützung verwenden
D	Realisierung des visuellen Feedbacks durch Farben und weitere Effekte nach Style-Guides abstimmen und implementieren
E	Visuelles Feedback als grundlegendes Element der Interaktion in Betracht ziehen, wenn dadurch unterstützende Faktoren wie Genauigkeit oder Latenzreduzierung erreicht werden
F	Anatomie der Arme und Ankerpunkte der Hände für Feedbackausgabe in Erwägung ziehen

Tabelle 6: Richtlinien zum Aspekt Feedback

## User Interface Richtlinien

Neben der Entscheidung über geeignete Feedbackformen und der Positionierung eines Interfaces muss generell zunächst entschieden werden, wie ein Interface aussehen bzw. aus welchen Komponenten ein Interface bestehen soll. Für diese Arbeit soll ein On-body Interface mithilfe von AR entstehen, welches für die Arbeit mit CAD-Anwendungen geeignet ist. Wie aus bereits vorangegangenen Kapiteln zu entnehmen ist, eignen sich dafür vor allem Interfaces, die keine zusätzlichen Gerätschaften benötigen und entweder über Gesten, Sprachsteuerung oder Berührungen auf der Haut bedient werden können.

Für On-body Interfaces wurden bereits wie in [Harrison und Wilson, 2011], [Bowman und Wingrave, 2001] oder [Dezfuli und Müller, 2012] erfolgreiche Verfahren zur Darstellung und Bedienung von On-body Interfaces auf den Armen und den Händen implementiert, darunter Konfigurationen mit Projektoren und Sensoren, welche die Bewegungen eines Nutzers erfassen und mit interaktiven Oberflächen, z.B. den eigenen Händen oder Tischen kalibrieren. Mitunter hat sich eine Tendenz zu Hand-Interfaces gegenüber Arm-Interfaces heraus kristallisiert, die zwar mehr Oberfläche, jedoch weniger Ankerpunkte aufweisen und weniger ergonomische Möglichkeiten erlauben. Beim Einsatz von Hand-Interfaces werden auch wie in [Harrison und Wilson, 2011] Zweihand-Gesten erfasst, sodass eine Hand das Interface darstellt, die andere Hand das Interface bedient. Die Bedienung eines On-skin Interfaces mit zwei Händen, wird auch multi-touch genannt und ist für Interaktionen wie Klicken oder Wischen geeignet [Weigel et al., 2014]. Dadurch ist eine ergonomische und intuitive Bedienung möglich [Harrison et al., 2012].

Intuitive Bedienung birgt jedoch die Herausforderung, sowohl für Einsteiger als auch für Experten gleichermaßen geeignet zu sein, weshalb eine gewisse Konfigurationsfunktion eines Interfaces bzw. eines Systems zu berücksichtigen ist [Schaer und Thum, 2007]. Konfiguration beinhaltet bspw. die Anzahl und Größe von UI-Elementen oder wie viele Hilfstexte auf einem Bildschirm angezeigt werden. In Dezfuli und Müller [2012] wurde herausgefunden, dass z.B. mehr als vier Funktionen auf einer Handfläche die Performance der Zielgenauigkeit auf der Hand erheblich verringern. Finger samt Markierungen als Funktionsgrundlage wie bspw. in Abbildung 25 hingegen, weisen keine Einbußen bezüglich Performance durch Zielgenauigkeit auf [Weigel et al., 2014; Harrison et al., 2011; Sasaki et al., 2002]. Für Funktionen auf der Handfläche muss jedoch gelten, dass die Funktionen, z.B. entstanden durch Projektionen, eine Mindestgröße von 28 Millimeter aufweisen, um präzise bedient werden zu können [Dezfuli und Müller, 2012]. Für die Finger bedarf es einer Mindestgröße von 9.5 Millimeter, was vergleichbar mit Funktionen auf einem Smartphone ist [Gustafson et al., 2011].

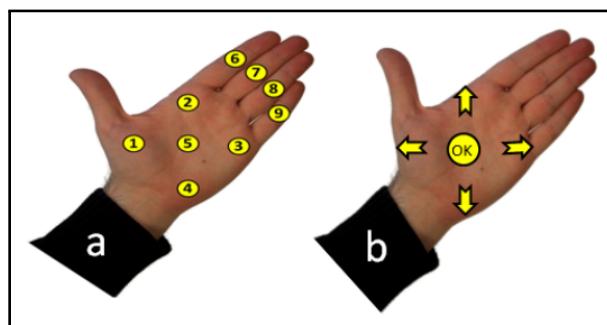


Abbildung 25: Ankerpunkte und Funktionsbeispiel auf einer Handfläche  
[Dezfuli und Müller, 2012]

Generell sollte ein Interface nicht zu überladen wirken und ausreichend Platz für die Darstellung der Aktionen und Aufgaben eines Nutzers bieten. Darum sollte die grafische Präsentation, sprich die Ergebnisse der Aktionen eines Nutzers auf dem eingesetzten Ausgabegerät, stets den Fokus auf die Aufgaben legen und UI-Elemente nur bei Bedarf eingebendet werden [Endsley et al., 2017; Vajna et al., 2018]. Bei den Untersuchungen von [Schaer und Thum, 2007] wurde dazu festgestellt, dass Dreidimensionalität für UI-Elemente, vor allem in Bezug auf AR für Probleme sorgt, weshalb 2D im Falle von On-body Interaktionen zu bevorzugen ist. Die Projektion auf die Handfläche und Finger wurde in Experimenten von den Testpersonen unter Einsatz von zweidimensionalen UI-Elementen als intuitiv und komfortabel empfunden, gegenüber einer Projektion auf den Handrücken [Gustafson et al., 2011; Harrison et al., 2012; Weigel et al., 2014].

Zu beachten gilt bei einem Hand-Interface jedoch, dass sich Funktionen nicht überlagern oder versehentlich ausgeführt werden [Weigel et al., 2014]. Durch Berücksichtigung von Standards kann nicht nur die Lernbarkeit eines Systems gefördert, sondern auch einer Inkonsistenz zu herkömmlichen Interfaces vorgebeugt werden [Vajna et al., 2018; Dünser et al., 2007]. Um zusätzlich komplizierte Befehlsketten zu vermeiden und die Einfachheit eines Systems zu unterstützen, können u.a. Funktionen wie Aktionsabbruch oder Schritt zurück implementiert werden. Dadurch kann im Fall von versehentlichem Ausführen einer Aktion bspw. durch Überlagerung, das Resultat widerrufen und der vorherige Zustand des Systems eingenommen werden [Schaer und Thum, 2007; Al-wabil et al., 2007]. Werden keine Zustands-Kontrollfunktion und auch keine Beschränkungen implementiert, können ungewollte Fehler entstehen, die durch eine entsprechende Fehlerbehandlung kuriert werden müssen [Al-wabil et al., 2007]. Klick-Interaktionen führen nach Harrison und Wilson [2011] zu den geringsten Fehlern und sollten bevorzugt eingesetzt werden. Die Zusammenfassung der erarbeiteten Prinzipien und Richtlinien für die Erstellung eines Hand-Interfaces für On-skin Interaktionen, ist in Tabelle 7 aufgelistet.

A	Bevorzugung der Hände gegenüber der Arme als Interface
B	Multi-touch Eingabe für Klick-Interaktionen ermöglichen
C	Konfigurationsmöglichkeiten für verschiedene Erfahrungslevel der Benutzer beachten
D	Nicht mehr als vier Funktionen auf eine Handfläche legen
E	Mindestgröße von projizierten Buttons auf Handfläche: 28 Millimeter
F	Mindestgröße von projizierten Buttons auf Finger: 9.5 Millimeter
G	Unterstützende oder zusätzliche Funktionen nur bei Bedarf einblenden
H	Dreidimensionalität für UI-Elemente vermeiden
I	Interface auf Handfläche und Finger ist Handrücken vorzuziehen
J	Funktionen nicht überlagern und versehentliche Ausführung entsprechend behandeln oder verhindern
K	Aktionsabbruch und Schritt zurück Funktionen in Betracht ziehen
L	Klick-Interaktionen bieten geringste Fehleranfälligkeit

Tabelle 7: Richtlinien zum Aspekt User Interface

### Richtlinien für Computer-aided Design

Auch im Kontext von CAD bzw. CAx sind spezielle Richtlinien vorhanden, um eine reibungslose und unterstützende Funktion durch ein On-body Interface samt AR-Technologie zu gewährleisten. Beispielsweise sollte sich ein CAx-System den Erfahrungslevel eines Nutzers merken, um das Interface dafür geeignet anzupassen. Dadurch wird auch die Handhabung der Intuition eines Nutzers entgegen angeglichen und gewisse Erwartungen und Bedürfnisse erfüllt [Vajna et al., 2018]. Ebenfalls sollte ein unterstützendes Interface die Konsistenz beibehalten oder wenn möglich erhöhen, sprich den herkömmlichen, thematischen Aspekten von CAD-Systemen angepasst werden. Konsistenz kann bspw. durch die Verwendung von CAD-üblichen Symbolen erreicht werden, sodass ein Umlernen ausbleibt [García Reyes, 2013; Vajna et al., 2018]. Die Inkonsistenz und Vielfalt der CAx-Anwendungen und Interfaces gilt als primäres Problem, weshalb aktiv an modernen Lösungen zur Unterstützung von Produktentwicklern gearbeitet wird.

Stets gilt dabei, Usability vor Funktionalität, Funktionalität vor Komplexität, weshalb z.B. verschachtelte oder gestaffelte Funktionen wenn möglich vermieden werden sollten. Das begrenzte Denkvermögen sorgt dafür, dass komplexe Funktionen nicht im Gedächtnis bleiben, woraufhin die Performance eines Produktentwicklers sinkt. Fehlende Hilfen unterstreichen die Hilflosigkeit und begünstigen Defizite in der Produktentwicklung [Kosmadoudi et al., 2013]. In Tabelle 8 sind die für CAD spezifischen Richtlinien nochmals stichpunktartig zusammengefasst.

A	Erfahrungslevel eines Nutzers berücksichtigen
B	Konsistenz zu etablierten CAD-Systemen herstellen bspw. bekannte CAD Symbolik für UI-Elemente verwenden
C	Verschachtelte oder gestaffelte Funktionen vermeiden
D	Nutzern auf Wunsch angemessene Hilfen anbieten z.B. durch Hilfstexte

Tabelle 8: Richtlinien zum Aspekt Computer-Aided Design

### 3.1.2 Eingrenzung

Im Rahmen dieser Arbeit soll ein On-body Interface für den Einsatz in CAD-Anwendungen zur Reduktion von Komplexität unter Verwendung von AR entstehen. Das Interface soll am Ende Produktentwickler im Produktentstehungsprozess durch Vereinfachung der Menü-Navigation und Funktionsauswahl in CAD-Anwendungen unterstützen. Dafür wurden zahlreiche Richtlinien gesammelt und Vergleiche zu verwandten Arbeiten gezogen, um eine Grundlage sowie ein Verständnis für angemessene Interface-Implementationen im entsprechenden Kontext auf- und auszubauen.

Für den zu entwickelnden Prototypen wird den vorangegangenen Untersuchungen nach, ein On-skin Interface auf der Handfläche sowie auf den Fingern nach eruierten Ankerpunkten [Dezfuli und Müller, 2012] entstehen. Dabei werden die Richtlinien aus den vorherigen Kapiteln berücksichtigt und mit einbezogen. Das Interface wird demnach aus zweidimensionalen UI-Elementen bestehen und nicht mehr als vier Funktionen auf der Handfläche fassen. Die Mindestmaße für Größe und Position unter Beachtung von Performance Gesetzen wie Fitts Gesetz zur Genauigkeit und Geschwindigkeit von benachbarten Elementen werden ebenfalls berücksichtigt. Ergonomische Faktoren wie der Abstand eines Interface zum eigenen Körper sowie die Lage im Raum werden beachtet.

Prinzipien wie KISS und der Verzicht auf externe Gerätschaften wie Handschuhe oder ein Hmd sollen für eine freie, ergonomisch angemessene Usability des Prototypen sorgen. Einheitlichkeit sowie die Verwendung von CAD Symbolik für UI-Elemente sollen die Konsistenz zu herkömmlichen CAD-Systemen fördern und eine intuitive Einarbeitung in den Prototypen erleichtern. Entsprechende Technik und Hardwarewahl sollen für geringe Latenzen sorgen und damit positive Erfahrungen mit dem Prototypen begünstigen. Zum Einsatz kommen Projektoren und Kameras wie in [Harrison und Wilson, 2011], um ein natürliches Abbilden von UI-Elementen auf den eigenen Körper zu ermöglichen, sowie die Eingaben eines Nutzers durch Tiefenerkennung und entsprechende Sensorik zu erfassen.

Die Eingaben geschehen durch Klick-Interaktionen auf der nicht dominanten Hand, um sowohl eine intuitive Bedienung als auch eine hohe Präzision zu fördern. Durch klare Aufgabenstellungen und Beschränkungen sollen Fehler durch einen Nutzer vermieden werden. Eine entsprechende Fehlerbehandlung oder Zustands-Kontrolle wird in Betracht gezogen. Für das Feedback des Interfaces gilt, jede der Aktionen eines Nutzers durch Feedback zu bestätigen. Dabei wird auf visuelles Feedback als primäres Element zurückgegriffen, sowie die feedback compliance nach [LaViola et al., 2004] berücksichtigt. Feedback sowie die UI-Elemente an sich, sind nur bei Bedarf ein- und bei Nichtverwendung auszublenden.

Die verwendbaren Funktionen auf Handfläche und Finger werden nach ergonomischen Bedingungen angeordnet, sodass ein Überlappen und ein Fehlinterpretieren vom System reduziert wird. Verschachtelte und gestaffelte Funktionen wie Befehlsketten werden nur dann eingesetzt, wenn es der Funktion der Navigation im Menü dient. Sollte ein Nutzer Hilfe benötigen, so sind dementsprechende Hilfen vorhanden, z.B. in der Form von Hilfstexten oder Markierungen. Um das bestmögliche Ergebnis für den Prototypen zu erzielen, werden mehrere Varianten ausgehend von den beschriebenen Kriterien konzipiert und diskutiert.

## 3.2 Entwicklung des Prototypen

### 3.2.1 Beispielszenario

Um das On-body Interface nach der Entwicklung für realistische und technisch anspruchsvolle Anwendungsfälle nutzen zu können, dient als Beispielszenario die Erstellung eines Zahnrades nach einer Anleitung des StutCAD der Universität Stuttgart [StutCAD, 2020]. Das dabei entstehende Zahnrad kann Abbildung 26 entnommen werden.

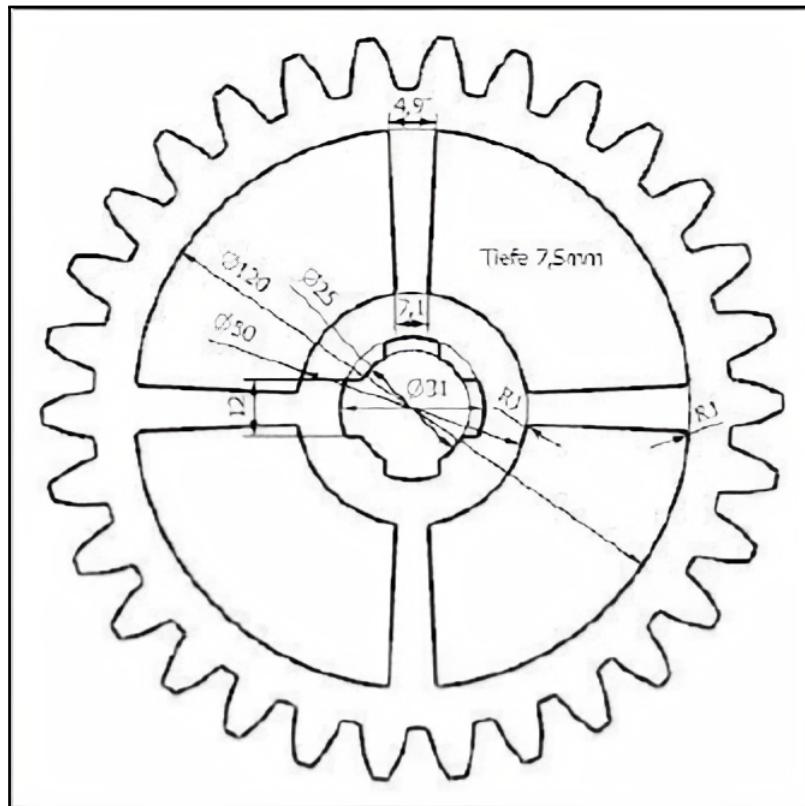


Abbildung 26: Technische Skizze eines Zahnrads  
[StutCAD, 2020]

Die beschriebenen Arbeitsschritte werden als Grundlage für den zu entwickelnden Prototypen miteinbezogen. Dabei werden u.a. mehrstufige Interaktionen und geschachtelte Funktionen benötigt, um bspw. Objekte zu modifizieren. Die Anleitung ist für die CAD-Umgebung NX von Siemens angefertigt worden, kann jedoch auch auf andere CAD-Umgebungen übertragen werden. Die einzelnen Schritte sind folglich aufgeführt und zusammengefasst beschrieben, um einen Überblick über die Interaktionen eines Produktentwicklers beim Erstellen einer Schraube in einer CAD-Umgebung zu erhalten. Aufgaben wie die beschriebene und weitere sollen vom Prototypen unterstützt werden.

## **Definieren der Parameter**

Zunächst wird ein entsprechender Reiter namens "Werkzeugeausgewählt", worin die Funktion Ausdrücke selektiert wird. In der sich öffnenden Tabelle können Ausdrücke bzw. Parameter wie die Zahnradbreite oder die Anzahl der Zähne für das zu erstellende Objekt per Mausklick und anschließender Tastatureingabe festgelegt werden.

## **Erstellen einer Skizze**

Nachdem alle Parameter festgelegt wurden, wird eine Skizze angelegt, wobei anschließend die definierten Parameter für die Berechnung von radialen Bemaßungen und Positionen genutzt werden können. Durch Mausklicks auf die Bemaßungs- und Positionsfunction können die Bezeichner für die Parameter per Tastatur eingegeben und bestätigt werden. Danach werden Hilfslinien über eine Hilfslinien-Funktion erstellt, indem per Rechtsklick die entsprechende Funktion und per Linksklick die dafür vorgesehenen Linien ausgewählt und bemaßt werden. Nach der Erstellung der Hilfslinien werden Kreisbögen verlaufend an den Hilfslinien definiert und gespiegelt, um den ersten Zahn des Zahnrads skizzenhaft darzustellen. Durch eine Trimmfunktion können nicht genutzte Linien entfernt und die Skizze abgeschlossen werden.

## **Volumenkörper aus Skizze anfertigen**

Um eine plastische Ansicht der Skizze zu erhalten wird über Mausklick die Extrudieren-Funktion selektiert und die Skizze des ersten Zahnes für die Extrusion ausgewählt. Per Kantenverrundung werden der Zahnkopf sowie der Zahnuß rund gemacht, indem jeweils die Kopf und Fuß definierenden Linien angewählt und ein Maß für die Verrundung ausgewählt und bestätigt wird.

## **Formelement aus Volumenkörper mustern**

Zur Komplettierung des Zahnes zu einem Zahnräder, wird die Funktion "Formelement mustern" per Mausklick ausgewählt. In der Funktion kann die Anzahl der Zahn-Kopien eingegeben oder aus den Parametern entnommen werden. Danach folgt die Auswahl der Richtung, in welcher die ausgewählte Form vervielfältigt werden soll, sowie der Winkel und der Abstand der Kopien zueinander, die wiederum durch Parameter oder Tastatureingaben gefüllt werden. Durch Bestätigung per Mausklick wird der Zahn vervielfältigt und entsprechend der ausgewählten Achse angelegt. Durch Auswahl der Vereinigen-Funktion können obsolete Linien mit Klick auf die gewünschten Formen gelöscht werden.

### **Bohrung auf Formelement durchführen**

Um schließlich die mittlere Bohrung am Zahnrad zu erstellen, wird die Bohrung-Funktion per Mausklick ausgewählt und ein Zahnkopf oder Zahnfuß als Referenz zum Mittelpunkt für den Bohrursprung festgelegt. Durch Tiefenbegrenzung und Eingabe der Parameter für den Durchmesser wird die Bohrung schließlich per Mausklick bestätigt.

### **Keilwellenverbindung aus Skizze erstellen**

Für die Erstellung der Keilwellenverbindung in der Mitte des Zahnrades, wird eine neue Skizze benötigt, die so wie der Zahn zuvor, per Skizzenfunktion und Kreisbögen erstellt wird. Die Kreisbögen werden wie beim Zahn gespiegelt und durch vertikale Linien bemäst. Durch einen Klick auf Bestätigen wird die Skizze für die Keilwellenverbindung angelegt. Durch anschließende Extrusion der neuen Skizze kann das neue Element aus dem bestehenden Zahnrad entnommen werden. Die Musterung des entstandenen Formelementes wird durch die namensgebende Funktion wiederum vervielfältigt und per Klick bestätigt. Somit entstehen Kopien der Extrusion in der Mitte des Zahnads.

### **Erstellen der Vertiefungen**

Mithilfe von zwei Kreisbögen die per Kreisbogen-Funktion erstellt und per Schnellbemaßung in der Form angepasst werden, entsteht die Grundform der Vertiefungen. Zwei Hilfslinien auf der horizontalen und vertikalen Achse helfen den Winkel für die Vertiefungen festzulegen. Die Hilfslinien werden per Hilfslinien-Werkzeug ausgewählt und durch eine Tastenkombination rechtwinklig zueinander vom Ursprung des Zahnads aus angeordnet. Durch Rechtsklick auf eine Hilfslinie kann die Hilfslinie als Referenz bezeichnet werden, sodass diese nicht mehr als aktives Skizzen-Element behandelt, jedoch sichtbar bleibt. Die Schnellbemaßung der Kreisbögen zu den Hilfslinien sorgt dafür, dass die Vertiefungen den vorgegebenen Parametern entsprechend in der Breite durch Auswahl des Start und Endpunktes per Mausklick angepasst werden können. Mit der Subtrahieren-Funktion kann die Skizze der Vertiefung schließlich angepasst und durchgeführt werden, woraufhin eine Vertiefung im Zahnrad entsteht. Durch Auswahl von "Formelement mustern" kann die Vertiefung wiederum vervielfältigt werden. Schließlich werden die Vertiefungen durch Auswahl der Funktion "Formelement spiegeln" auf die Unterseite des Zahnads nach Tastatureingabe der Anzahl und des Abstandes gespiegelt. Das fertige Zahnrad ist in Abbildung 27 dargestellt.

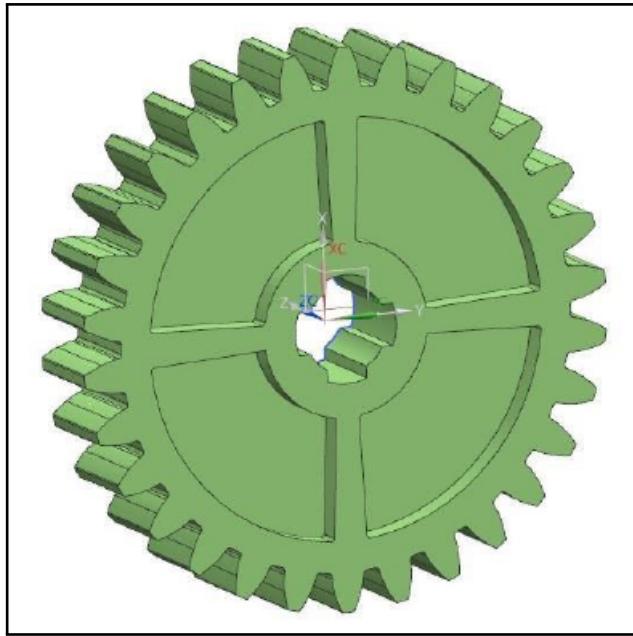


Abbildung 27: Aus Skizze angefertigtes Zahnrad  
[StutCAD, 2020]

Beim Erstellen des Zahnrads werden Funktionen wie Extrudieren, Skizze erstellen, Hilfslinien erstellen oder Formelement mustern mehrfach ausgewählt und durchgeführt. Auch die Eingabe der Parameter wird mehrmals durch die gleiche Abfolge an Arbeitsschritten herbeigeführt. Als Grundlage für das Interface werden die routinierten Abläufe und Wiederholungen von Funktionsaufrufen für das zu entwickelnde Interface herangezogen. Eine Mehrfach-Auswahl und Redundanz beim Erstellen von 3D-Modellen soll somit vermieden werden, sodass der Fokus der 3D-Ansicht nicht aufgegeben werden muss.

### 3.2.2 Vorgehen Interface-Design

Das zuvor beschriebene Szenario verdeutlicht die Problematiken aus Kapitel 2.3.7. Nicht intuitive, uneinheitliche und komplizierte Menüs erschweren die Arbeit mit verschiedenen CAD-Anwendungen, was ein ständiges Anpassen und Umgewöhnen zur Folge hat. Auch die Performance wird durch zeitintensive Menüodysseen verringert, was den Durchsatz in der Produktentwicklung beeinflusst. Darum gilt es, ein Menü zu entwickeln, welches die Arbeitsschritte für Operationen wie das Polstern eines Objektes minimiert und dadurch Ressourcen einspart. Für das Hand-Interface werden zunächst Skizzen angefertigt. Die Skizzen sollen helfen, die Vorgaben für das Interface in der darauffolgenden Realisierung adäquat umzusetzen. Ebenfalls kann durch die Skizzen das Größen- und Verteilungsverhältnis der UI-Elemente von Anfang an begutachtet und optimiert werden.

Bei der Konzeption werden mehrere Konzeptionen angefertigt, worunter schließlich die Variante für den Prototypen ausgewählt wird, die sich am Besten für das beschriebene Szenario eignet und dabei die erhobenen Anforderungen und Kriterien erfüllt. Die Varianten werden in der pragmatischen sowie der technischen Eignung überprüft und verglichen sowie mithilfe der bereits eruierten Erkenntnisse kritisch begutachtet.

### 3.2.3 Konzeption

Um die Skizzen anzufertigen wird ein Grafik- und Zeichenprogramm verwendet, welches die Möglichkeit bietet, nach einem definierten Grundmodell vorzugehen und die Varianten vergleichbar gestalten zu können. Da keine komplexen Grafiken oder Modelle angefertigt werden müssen, kann auf kostenpflichtige oder von Herstellern wie Adobe bereitgestellte Expertenprogramme verzichtet werden. Zum Einsatz kommt somit das von Microsoft mit Windows 10 kostenlos zur Verfügung gestellte Paint 3D<sup>6</sup>.

Paint 3D bietet u.a. Funktionen, 2D-Figuren in 3D-Modelle umzuwandeln und umgekehrt. Dadurch lassen sich bspw. UI-Elemente durch verschiedene Formen und Farben darstellen und anschließend in ein Koordinatensystem mit drei Achsen übertragen. Im dreidimensionalen Koordinatensystem können danach die UI-Elemente in der Höhe und Breite passend definiert werden, sodass eine realistische und im Verhältnis zu den Anforderungen angemessene Darstellung ermöglicht wird. Des Weiteren können die erstellten Modelle als Bilder exportiert oder als Projekte gespeichert werden, wodurch nachfolgende eventuelle Änderungen problemlos möglich sind.

Für die CAD-Symbole wie in Tabelle 8 (B) beschrieben, wird auf kostenlose CAD Icons von Flaticon<sup>7</sup> zurückgegriffen. Die verwendeten Icons sind für den nicht kommerziellen Gebrauch freigegeben und ersparen eine zeitintensive Selbstanfertigung. Auch sind die angefertigten Grafiken mit denen von etablierten CAD-Systemen konform, wodurch die Konsistenz beibehalten wird.

Um die Hände abzubilden, können die von Paint 3D standardmäßig vorhandenen Hand-Modelle verwendet werden. Die Modelle sind u.a. als ausgestreckte Variante oder auch in Form von Gesten vorhanden, wodurch Use-Case ähnliche Darstellungen abgebildet werden können. Die Hand-Modelle lassen sich problemlos drehen und skalieren, wodurch eine Vielzahl an Konstellationen ermöglicht wird.

---

<sup>6</sup><https://www.microsoft.com/de-de/p/paint-3d/9nb1gg5fv99?activetab=pivot:overviewtab> - Zugriff am 22.07.2021

<sup>7</sup><https://www.flaticon.com/de/packs/cad> - Zugriff am 22.07.2021

## Use Cases

Bevor konkrete Skizzen konzipiert werden können, werden für die entsprechenden Funktionen passende Use Cases definiert, wodurch auch die Anforderungen an bspw. die Usability explizit hervorgehoben und berücksichtigt werden können.

### *Interface (de-)aktivieren:*

Mit dem Drehen der Handfläche nach oben, wird das Interface aktiviert, durch Drehen der Handfläche nach unten wird das Interface deaktiviert.

### *Funktion hervorheben:*

Durch Schweben über einer Funktion in definiertem Abstand wird die Funktion farblich hervorgehoben.

### *Funktion selektieren:*

Wird eine Funktion direkt ausgewählt, so wird die Funktion farblich hervorgehoben, die Interaktion durch ein Audiosignal unterstützt und eine entsprechende Funktionalität ausgelöst.

### *Hilfe anzeigen/verbergen:*

Beim Selektieren der Hilfefunktion werden zusätzliche Informationen zu den Funktionen eingeblendet und die visuelle Präsentation des Hilfe-Buttons dauerhaft geändert. Ein erneutes Selektieren versetzt den Hilfe-Button zurück in den Urzustand und blendet die Zusatzinformationen aus.

Um den funktionellen Ansatz des Interfaces darzustellen, werden in Abbildung 28 die Anwendungsfälle in einem Use-Case-Diagramm zusammengefasst. Als Akteure agieren u.a. ein Benutzer des Interfaces sowie die UI- und die CAD-Anwendung, die mit dem Interface verbunden sind. Die Aktionen sind auf die entsprechenden Anwendungen verteilt und Abhängigkeiten dargestellt. Das System hat den prototypischen Namen “On-body CAD Assistant UI System“ erhalten, um den Nutzen des Prototypen auch namentlich festzuhalten.

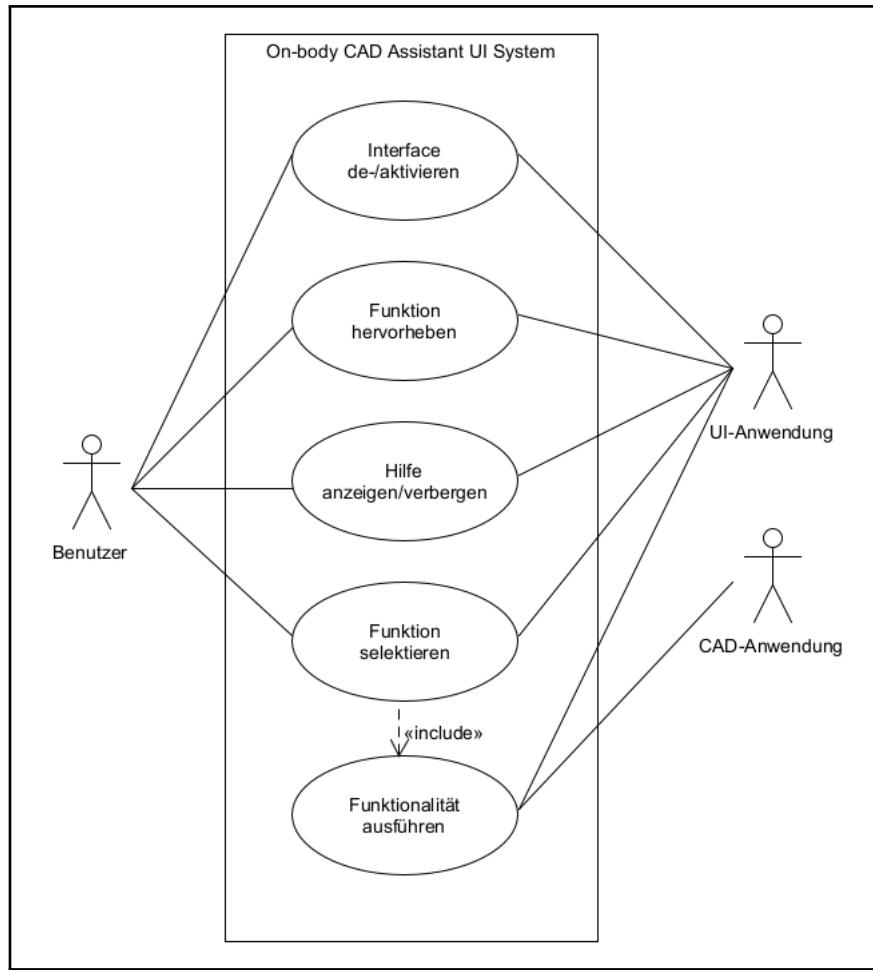


Abbildung 28: Use-Case Diagramm des Prototypen  
(e.D.)

### Variantendiskussion

Aus der Konzeption mit Paint 3D sind sieben verschiedene Varianten entstanden, die im folgenden aufgezeigt und anhand interner Tests sowie bereits eruieter Erkenntnisse aus dem Grundlagenpart diskutiert werden. Die Varianten weisen vereinzelt Gemeinsamkeiten auf, um eine Vielzahl an möglichen Umsetzungen zu erfassen. Die Konzeptionen gelten allesamt für Rechtshänder, können jedoch in einer späteren Iteration auch für Linkshänder umgesetzt werden. Für die Varianten wurden je nach Relevanz ein bis drei Anwendungsfälle visuell abgebildet, um die Auswirkungen und Benutzung hervorzuheben. Bei den Varianten wurden die zuvor definierten Anforderungen berücksichtigt. Die Zahlen der Varianten bilden dabei keine Reihenfolge, sondern sind Parameter aus der internen Struktur bei der Konzeption.

Variante (1) und (7):

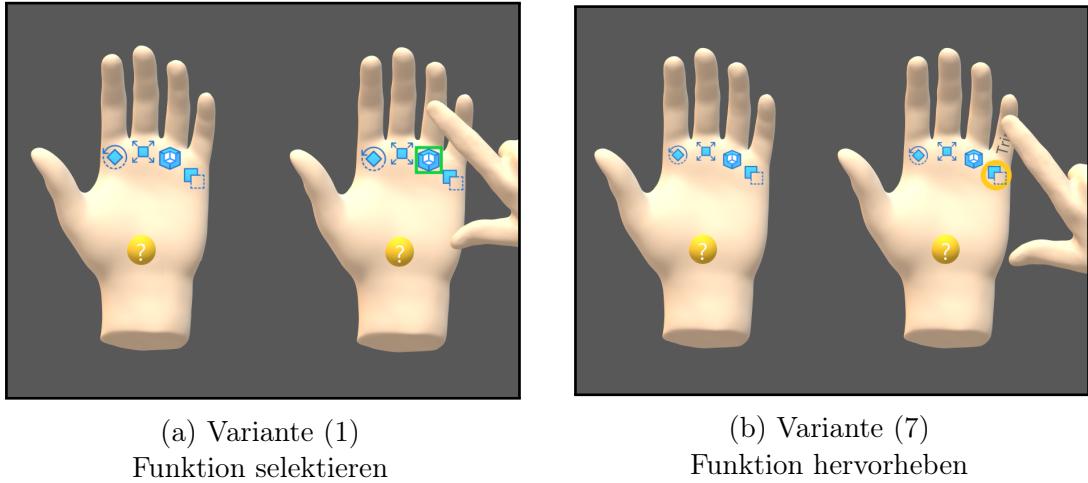


Abbildung 29: Konzeption Variante (1) und (7)  
(e.D.)

In Abbildung 29 ist der Vergleich zwischen Variante (1) und (7) dargestellt. Variante (1) beinhaltet die Ausführung von Funktionen auf den Fingern, die Hervorhebung von Funktionen am Fingerknöchel sowie einen Hilfe-Button am Handgelenk. Variante (7) unterscheidet sich von Variante (1) darin, dass farbliche Hervorhebung rund und eine zusätzliche textuelle Information auf den Fingern beim Schweben über einer Funktion darzustellen. Beim Testen wurde bei beiden Varianten festgestellt, dass die visuelle Hervorhebung von Funktionen sowohl beim Schweben über als auch beim Selektieren von Funktionen recht undeutlich ist. Die Sichtbarkeit des visuellen Feedbacks ist aufgrund der rechteckigen und unauffälligen Darstellung sowie der Anordnung der Funktionen beschränkt. Auch können die textuellen Informationen je nach Blickwinkel und Position der Hand nicht gelesen werden, wenn sich eine Hand über einem Finger befindet. Positiv jedoch ist der freie Platz auf der Handfläche für weitere Informationen, sowie die deutliche Unterteilung von CAD-Funktionen und Hilfefunktion.

Variante (2) und (4):

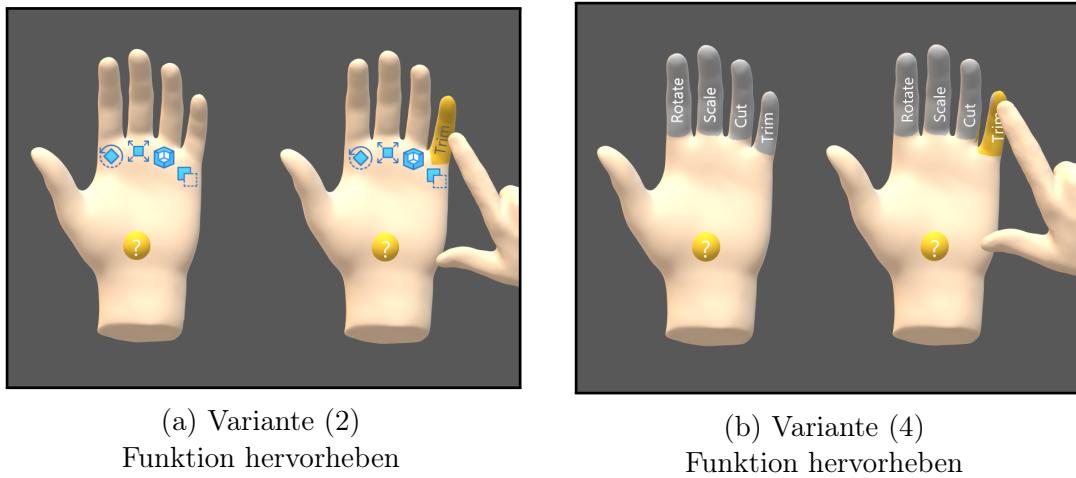
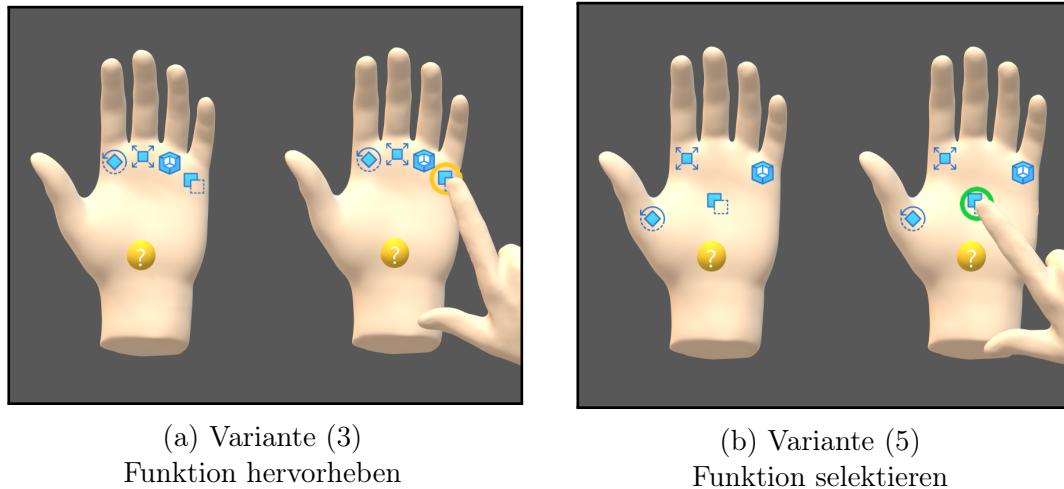


Abbildung 30: Konzeption der Varianten (2) und (4)  
(e.D.)

Abbildung 30 verdeutlicht die Herangehensweise von Variante (2) und (4). Die Hervorhebung einer Funktion geschieht demnach auf den Fingern direkt. Textuelle Informationen befinden sich wie auch schon in Variante (7) auf den Fingern. Da Finger u.U. feingliedrig und unterschiedlich lang sein können, kann die problemlose Darstellung und Funktionalität nicht gewährleistet werden. Text müsste je nach Benutzer in der Größe angepasst werden, was einen zusätzlichen Konfigurationsaufwand bedeutet. Auch besteht weiterhin das Problem der Überlagerung sowie eine eventuelle Kontrasthürde von Text und Farben beim Hervorheben oder Selektieren von Funktionen. Bei Aktivierung der Hilfefunktion könnte jedoch der verfügbare Platz auf der Handfläche für anderweitige Informationen genutzt werden. Aufgrund der Ankerpunkte der Hand traten auch bei Variante (2) und (4) keine Bedienschwierigkeiten auf.

Variante (3) und (5):



(a) Variante (3)

Funktion hervorheben

(b) Variante (5)

Funktion selektieren

Abbildung 31: Konzeption der Varianten (3) und (5)  
(e.D.)

Variante (3) und (5) wie in Abbildung 31 veranschaulicht, sind durch eine von den bisherigen Varianten abweichende Interaktion gekennzeichnet. Anstelle der Interaktion auf den Fingern, um Funktionen hervorzuheben und zu selektieren, werden die Funktions-Symbole direkt angewählt. Variante (5) zeigt sogar einen weiteren Ansatz für die Anordnung der UI-Elemente, nach der Vorlage von Dezfuli und Müller [2012]. Die Interaktion in Variante (3) wirkte bei den Tests als intuitiv, jedoch war eine angemessene Größe der UI-Elemente aufgrund der beschränkten Handflächengröße nicht umsetzbar. Auch gab es Probleme in der Bedienbarkeit in Variante (3), da keine ausreichenden Abstände der UI-Elemente zueinander eingehalten werden konnten. Dazu kam wie bei Variante (7) eine zu geringe visuelle Feedback-Sichtbarkeit. Die Anordnung bei Variante (5) führte infolge der Nutzung keiner einheitlichen Ordnung zu Bedienbarkeit-Problemen, speziell beim Bedienen des Interfaces ohne Sichtkontakt. Das versehentliche Auswählen einer anderen Funktion war bei beiden Varianten präsent. Eine textuelle Hilfe konnte bei Variante (5) weder einheitlich noch angemessen eingefügt werden.

### 3.2.4 Finales Konzept

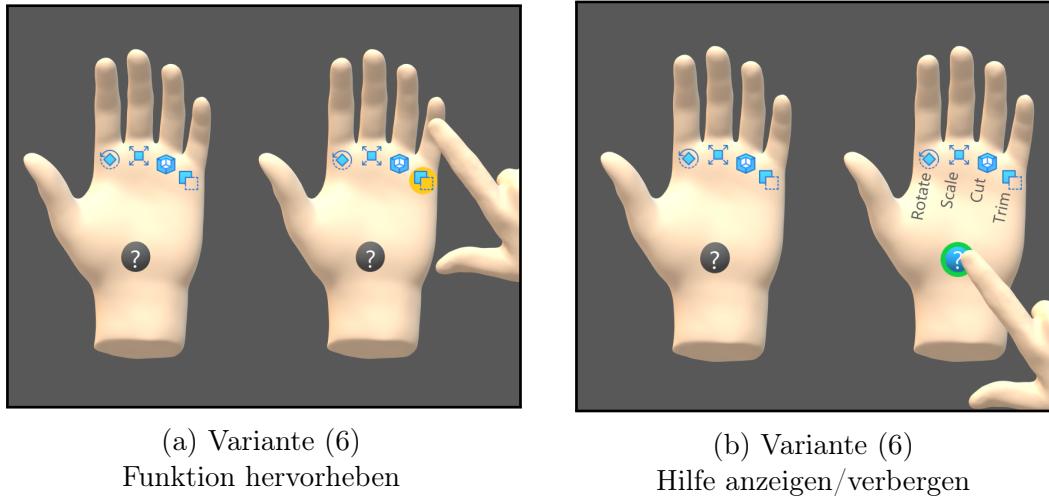


Abbildung 32: Konzeption der finalen Variante (6)

(e.D.)

Abbildung 32 zeigt, basierend auf den Erkenntnissen aus den theoretischen Grundlagen und den empirischen Erfahrungen aus der Konzeptionsphase, ein den Anforderungen und Kriterien gerechtes Modell, welches unter den genannten Varianten die höchste Usability, Bedienbarkeit und Erlernbarkeit aufweisen konnte. Die als Variante (6) bezeichnete Vorgehensweise, beinhaltet Elemente aus Variante (1), jedoch in einer deutlicheren und komfortableren Art und Weise. Bei Variante (6) werden weiterhin die UI-Elemente bei Schweben und Selektion farblich hervorgehoben, jedoch wird nicht nur ein dünner eingefärbter Rahmen, sondern eine ganzheitliche Einfärbung der zugrunde liegenden Fläche eines Symbols eingesetzt. Dadurch wird das visuelle Feedback der Interaktionen erhöht und verdeutlicht. Auch wurde die Farbe des Hilfe-Buttons geändert, um für das Hervorheben von UI-Elementen und die Hilfe nicht die gleiche Farbe zu verwenden, was zu Verwirrung in der Anwendung des Interfaces führen könnte. Der Hilfe-Button ist somit in einem Grauton gehalten und ändert bei Aktivierung die Farbgebung in einen Farbton, der unabhängig von anderen Interaktionen ist, um die eingeschaltete Hilfe zu verdeutlichen. Der verfügbare Freiraum auf der Handfläche kann mit Variante (6) weiterhin für textuelle Informationen genutzt werden, ohne andere UI-Elemente zu überdecken und bei Verwendung des Interfaces stets einsehbar zu bleiben.

Aufgrund der Interaktion auf den Fingern für die Hauptfunktionen des Interfaces wird auch die Bedienbarkeit und die blinde Erlernbarkeit gefördert, da genügend Abstand zwischen den Interaktionsräumen sowie ausreichend große Interaktionsflächen eingesetzt werden können. Zusätzlich ist das Interface bedingt durch die Anordnung in der Lage, mehrdimensionale Menüstrukturen abzubilden, wenn nötig.

### 3.2.5 Technische Umsetzung

#### Hardware

Um UI-Elemente auf den menschlichen Körper oder ein beliebiges Objekt zu projizieren, bedarf es entweder eines fortschrittlichen Wearables wie der HoloLens 2 wie in Kapitel 2.1.2 oder einem Projektor wie beim OmniTouch System [Harrison und Wilson, 2011]. Da das in dieser Arbeit zu entwickelnde System frei von tragbaren Geräten sein soll und somit passiv ist, wurde auf zusätzliche Gerätschaften am Körper verzichtet und ein Projektor als Ausgabegerät für die UI-Elemente eingesetzt. Als Projektor kommt dabei der BenQ W710ST<sup>8</sup>, dargestellt in Abbildung 33, zum Einsatz. Die Pfeile markieren die Position der internen Linse, wo die Bilder aufgenommen bzw. entwickelt und verarbeitet werden.



Abbildung 33: BenQ W710ST 120Hz Projektor  
(e.D.)

Der BenQ W710ST bietet u.a. eine Bildwiederholrate von 120 Hertz unter Verwendung von NVIDIA 3D Vision, sowie eine Auflösung von 1280x720 Pixel. Dadurch kann eine Ausgabe von Inhalten, z.B. von Händen, doppelt so schnell wiedergegeben werden, als mit einem 60 Hertz Beamer.

<sup>8</sup><https://www.benq.eu/de-de/support/downloads-faq/products/projector/w710st/manual.html> - Zugriff am 03.08.2021

Ebenfalls ermöglicht die 720p Auflösung eine für den Anwendungsfall ausreichende Detailschärfe, um Symbole und Text gut erkennbar darstellen zu können.

Zur Erfassung der Hände und um UI-Elemente auf die entsprechenden Ankerpunkte zu projizieren und dabei keine zusätzlichen Marker wie beim SixthSense System [Mistry und Maes, 2009] zu verwenden, wird das Stereo 170 IR Evaluation Kit<sup>9</sup> von Ultraleap, dargestellt in Abbildung 34, eingesetzt.



Abbildung 34: Ultraleap's Stereo 170 IR Evaluation Kit  
(e.D.)

Das Stereo 170 IR bietet die Möglichkeit, Hände aus unterschiedlichen Blickwinkeln und Entfernen zu erkennen und zu verfolgen, bzw. zu tracken. Tiefen- und Infrarotsensoren bewerkstelligen das Erfassen der dreidimensionalen Position und Rotation einer oder zwei Hände, was die Entwicklung eines On-body Interface erleichtert. Die stabile Tracking-Distanz von 10 bis zu 40 Zentimeter, ein Blickwinkel von 160 Grad sowie eine Bildwiederholrate von 90 Hertz für die Datenerfassung, bieten ausreichende technische Gegebenheiten für die Erstellung eines ergonomischen und benutzerfreundlichen Systems.

Um die Hardware-Komponenten am Arbeitsplatz anzubringen wurden Profilschienen und Metallgerüste verwendet, welche auch in der Position und Rotation gegebenenfalls geändert werden können. Der Aufbau des Setups kann sowohl im Testing des Systems als auch für spätere Zwecke außerhalb des Evaluationsrahmens benutzt werden.

---

<sup>9</sup><https://www.ultraleap.com/product/stereo-ir-170/> - Zugriff am 03.08.2021

Der eingesetzte Computer zur Entwicklung des Systems beinhaltet eine GeForce RTX 2070 Grafikkarte von NVIDIA, 32 GB Arbeitsspeicher sowie einen Intel i7 9750H Sechskern Prozessor. Somit wird auch gewährleistet, dass der Computer keine Engpässe bzw. technische Hürden erzeugt, wenn es um die Verarbeitung von Daten oder deren Wiedergabe geht. Auch kann dadurch ausgeschlossen werden, dass technische Schwierigkeiten auf veraltete oder inkompatible Hardware zurückzuführen sind.

## Software

Softwareseitig wurden diverse Programme und Tools eingesetzt, die u.a. dafür sorgen, die eingesetzten Komponenten miteinander zu verbinden, Daten zu empfangen und zu verarbeiten, als auch das System stabil, konfigurier- und wartbar zu machen. Dazu kommen die Programme, die schließlich das System bilden, sprich die Hauptkomponenten zwischen CAD-Produkt und Benutzereingaben abbilden.

Zur Entwicklung der Funktionalität auf Seite der UI-Anwendung wird Unity<sup>10</sup> in der Version 2019.4.12f1 verwendet. Unity ist kostenlos und beinhaltet u.a. eine eigene Engine für die Erstellung von Anwendungen wie Videospiele oder anderweitige Software, sowie einen durch das Unity-eigene Archiv herunterladbaren Support für Mixed Reality Komponenten, wie die Ultraleap Produkte. Ebenfalls ist die Integration des Projektors problemlos über dafür vorgesehene Einstellungen und Module möglich.

Auf Seite der CAD-Anwendung zum Testen der Funktionalität des On-body Interface, befindet sich das kostenlose Programm FreeCAD<sup>11</sup> in der Version 0.19.2. FreeCAD ist eine Open-Source CAD-Anwendung und somit in der Funktionsweise einsehbar. Mitgeliefert wird bei FreeCAD eine eingebaute Python API, zur Erstellung von Skripten und Makros, wodurch bspw. eine Verbindung von zwei Programmen hergestellt und Daten ausgetauscht werden können.

Um Skripte auf Seite der UI-Anwendung erstellen und bearbeiten zu können, bedarf es einer zusätzlichen Entwicklungsumgebung mit Unity-Support. Eingesetzt wird dafür Visual Studio 2017<sup>12</sup> in der kostenlosen Community Edition. Darin enthalten sind u.a. ein Debugger, Prefixing und Wortergänzungen, um möglichst effizient und effektiv Software-Projekte umzusetzen.

---

<sup>10</sup><https://unity.com/de> - Zugriff am 04.08.2021

<sup>11</sup><https://www.freecadweb.org/> - Zugriff am 04.08.2021

<sup>12</sup><https://visualstudio.microsoft.com/de/free-developer-offers/> - Zugriff am 04.08.2021

Zur Versionsverwaltung und iterativen Kontrolle des Projektes, wird Git<sup>13</sup> als Cloudspeicher für den entwickelten Code sowie die dazugehörigen Assets verwendet. Git ist kostenlos und bedarf lediglich einer Registrierung mit E-Mail und Passwort. Mit Git kann sichergestellt werden, dass bei fehlerhaften oder ungeeigneten Änderungen und Iterationen, vorherige Versionen des Prototypen erhalten bleiben. Der Prototyp wurde auf einem Windows 10 Pro Betriebssystem mit der Versionsnummer 20H2 entwickelt. Eine Kompatibilität zu älteren Betriebssystemen oder Versionen wird nicht ausgeschlossen.

## Technologien und Frameworks

Zum Erstellen der Funktionalitäten in Unity, wurde die Programmiersprache C-Sharp in der Version 9.0 verwendet. C-Sharp ist die primäre Programmiersprache in Unity und wird von Visual Studio 2017 ohne zusätzliche Plugins unterstützt.

Die in FreeCAD geschriebenen Skripte und Makros werden in der Programmiersprache Python verfasst, weshalb dafür Plugins und zur Interpretation notwendige Module installiert wurden. Python kam in der Version 3.9 zum Einsatz, welche gegenüber der 2. Python-Generation schneller und stabiler agiert, bessere Unterstützung für Unicode und Zahlen involviert, als auch einen langfristigen Support seitens der Hersteller bietet.

Zur Kommunikation zwischen der Ultraleap Stereo 170 IR und der UI-Anwendung wurde das entsprechende Leap Motion SDK mit der Versionsnummer 4.1.0 heruntergeladen und installiert. Das SDK beinhaltet ebenfalls eine Visualisierungsfunktion aus Sicht des Controllers zur Optimierung des Setups, sowie diverse Konfigurationsmöglichkeiten wie Sensorrichtung oder ob eine ressourcensparende Variante des Trackings verwendet werden soll.

---

<sup>13</sup><https://git-scm.com/> - Zugriff am 04.08.2021

## Vorgehen

Aus den beschriebenen Hard- und Software-Komponenten sowie der aufgeführten Technologien und Frameworks wurde das in Abbildung 35 dargestellte und in Abbildung 28 benannte System entworfen.

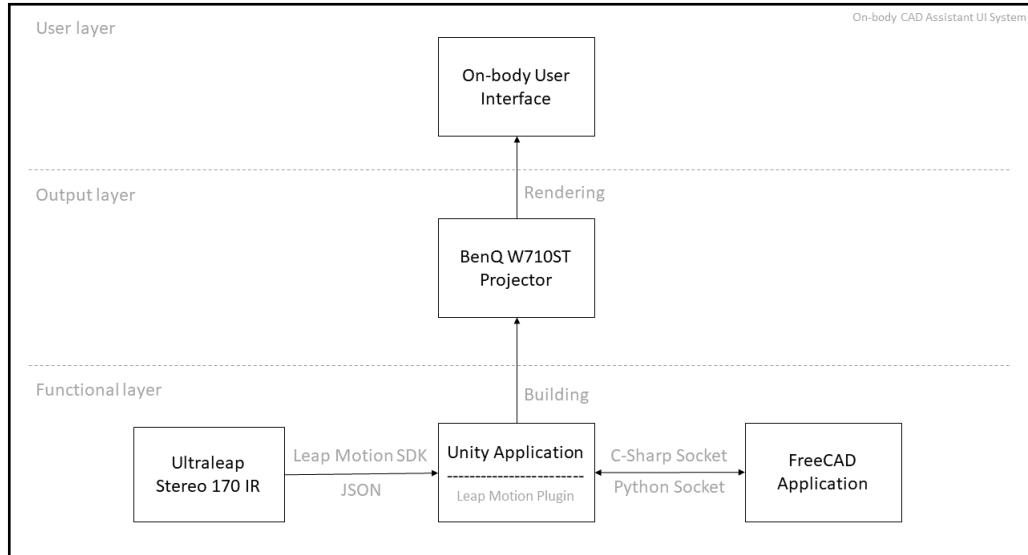
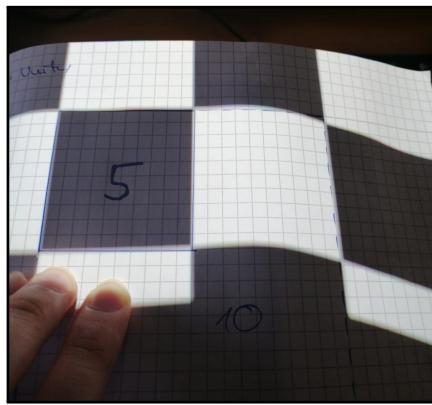


Abbildung 35: Systemdiagramm des Prototypen  
(e.D.)

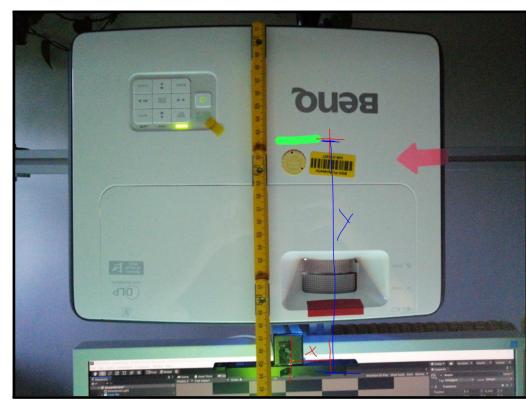
Bevor mit der Entwicklung begonnen werden konnte, wurden die eingesetzten Programme zunächst auf den neuesten Stand gebracht, sowie notwendige Module, Tools und Erweiterungen installiert. Die Einrichtung bei Unity verlangte zusätzlich zur Implementierung des Mixed Reality Supports, entsprechende Anpassungen für die eingesetzte Stereo 170 IR, wie bspw. neue Zeitschritt-Einstellungen. FreeCAD hingegen bedurfte einem kostenlosen Community-Plugin, wodurch Skripte oder Makros beim Start des Programmes automatisch geladen werden können. Auch mussten Anpassungen in den Programmdateien vorgenommen werden, sodass Python 3.9 akzeptiert und verwendet werden konnte. Visual Studio 2017 verlangte zur Erkennung der Unity-eigenen Bibliotheken eine entsprechende Installation des Unity-Moduls für Visual Studio 2017. Die Funktionalität der Ultraleap Stereo 170 IR wurde mit dem von Ultraleap eigenen SDK überprüft.

Sowohl der Ultraleap Controller als auch der Projektor arbeiten mit unterschiedlichen internen Koordinatensystemen, weshalb vor Entwicklung des Interfaces zunächst eine Kalibrierung der beiden Geräte durchgeführt werden musste. Da der Ultraleap Controller die genauen Positions- und Rotationsdaten der Hände eines Benutzers erfasst, muss der Projektor das eigene Koordinatensystem auf das Koordinatensystem des Ultraleap Controllers anpassen, um die UI-Elemente passend darzustellen.

Dafür wurden Messungen vorgenommen, die anschließend in Unity für die Einstellung des Frustum, sprich für die interne Abbildung des Interfaces verwendet werden konnten. Durch die Messungen konnte schließlich der Ursprung der Projektorlinse ermittelt und in Unity eingegeben werden. Ermöglicht wurde dadurch eine 1:1 Abbildung des Unity-Koordinatensystems, wodurch ein 5cm großes Objekt in Unity, einem 5cm großen Objekt in der Realität entspricht, was für die Darstellung der UI-Elemente von Bedeutung ist. Zur Überprüfung der Kalibrierung des Projektors zwecks Größeneinstellung wurde ein schachbrettartiges Muster entworfen und bei der Projektion anhand von Messverfahren überprüft. Das beschriebene Vorgehen kann Abbildung 36 entnommen werden.



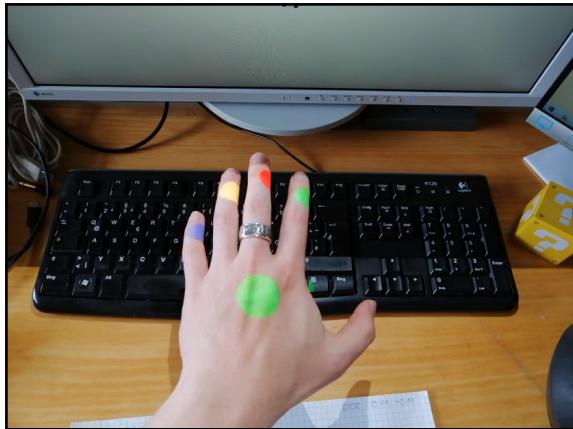
(a) Kalibrierung der z-Achse



(b) Messung der internen Projektorlinse

Abbildung 36: Projektor-Kalibrierungsverfahren  
(e.D.)

Die Kalibrierung wurde anschließend mittels farbiger Kreise und einem Handskelett vom Leap Motion Plugin auf der Handfläche überprüft. Die Kreise wurden dabei nach den eruierten Anforderungen zwecks Größe und Position erstellt. Um die Positionen zu korrigieren kam ein zusätzliches Skript zum Einsatz, welches das Frustum des Projektors auf einer zweidimensionalen Achse anpassen kann. Die erste Anpassung der UI-Elemente auf der Hand ist in Abbildung 37 ersichtlich. Das Handskelett wird je nach ermittelter Größe der Handfläche eines Benutzers vom Leap Motion Plugin selbst angepasst, woraufhin die anderen UI-Elemente folgen.



(a) Erster Platzierungsversuch von  
UI-Elementen



(b) Handskelett zum  
Größenabgleich

Abbildung 37: Korrektur des Projektor-Frustums  
(e.D.)

Nachdem Größe und Position der Koordinatensysteme aufeinander abgestimmt waren, konnte mit der Implementation der Funktionalitäten und UI-Komponenten begonnen werden. Aufgrund dessen, dass das Interface letztendlich auf der Handinnenseite platziert werden soll, wurden dementsprechend Algorithmen implementiert, die dafür sorgen, dass das Interface nur sichtbar wird, wenn die nicht dominante Hand nach oben zeigt. Dadurch wird auch eine unbeabsichtigte Interaktion mit dem Interface, sowie eine visuelle Ablenkung bei Nichtverwendung vermieden. Die von Flaticon importierten CAD-Icons wurden zufällig ausgewählt und testweise auf die Fingerknöchel nach der ausgewählten Varianten-Skizze angebracht. Je nach Testszenario können die verwendeten Symbole noch variieren. Da die Icons nicht zur Interaktion, sondern nur zur Orientierung und Veranschaulichung konzipiert sind, können die Icons in angemessener Größe auf den Fingerknöcheln platziert werden. Dazu wurden vom Leap Plugin bereitgestellte Ankerpunkte verwendet, woran die UI-Komponenten angehängt werden können. Abbildung 38 verdeutlicht die Anbringung der ersten UI-Elemente auf der Handinnenfläche. Der zur Konzeption dazugehörige und nach Anforderung wichtige Hilfe-Button wurde, da der Hilfe-Button im Gegensatz zu den Knöchel-Icons Interaktionen zulässt, nach den Richtlinien in Tabelle 7 implementiert.



(a) Ausblenden der UI-Elemente bei Handrücken

(b) Einblenden der UI-Elemente bei Handfläche

Abbildung 38: Ein- und Ausblenden der UI-Elemente (e.D.)

Um die Interaktion auf den Fingern zu realisieren, wurden vom Leap Plugin mitgelieferte Skripte für Buttons eingesetzt und an den Anwendungsfall dieser Arbeit angepasst. Beispielsweise wird dadurch eine Hover- und OnPress-Funktion, sprich Funktionalität beim Schweben über oder direktem Auswählen eines Fingers durch die dominante Hand ermöglicht. Die Skripte wurden anschließend in Unity bezeichneten GameObjects als Komponenten zugewiesen, wodurch die GameObjects interaktiv werden. Da das Tracking der Hände bei Überlagern der Hände Probleme bereitet hat, wurden die Interaktionsflächen auf die Fingerspitzen platziert. Dadurch wurde auch mehr Platz verfügbar und einem versehentlichen Ausführen benachbarter Funktionen vorgebeugt. Damit die Interaktionsflächen jedoch für einen Benutzer dem Anwendungsfall entsprechend unsichtbar bleiben, wurde ein neuer Layer, bzw. eine neue visuelle Schicht erstellt, wodurch die Objekte je nach Kameratyp gefiltert und entsprechend angezeigt oder verborgen werden. Abbildung 39 zeigt die Interaktion mit der ersten Testfunktion, welche bei Selektion eines Fingers „Hello World“ auf dem Tisch einblendet.



Abbildung 39: Erste Interaktion mit dem Prototypen (e.D.)

Damit beim Schweben über sowie beim Selektieren der Finger das visuelle Feedback erscheint, wurde ein Skript geschrieben, welches die Events für Hovern und Selektion des Leap-Skriptes abwartet und bei Eintreffen der Events unter den Fingerknöcheln liegende Flächen entsprechend orange für Hovern, und grün für Selektion einfärben. Wenn keine Interaktion stattfindet, schaltet das Skript die Feedback-Flächen aus. Unterstützend wird bei Selektion einer Funktion ein auditives Signal abgespielt, um die Interaktion zu bestätigen. Das Gleiche gilt für den Hilfe-Button, der jedoch zusätzlich bei Selektion blau eingefärbt wird, um anzuzeigen, dass die Funktion aktiv geschaltet ist. Beim erneuten Selektieren des Hilfe-Buttons wird der Hilfe-Button in den Urzustand zurückversetzt und dementsprechend grau eingefärbt. Um Benutzer über den Hilfe-Button zu unterstützen, wurden Hilfstexte implementiert, welche sich unter den Fingerknöcheln befinden, die bei Selektion einer Funktion zusätzlich kurz aufblenden. Abbildung 40 veranschaulicht die Interaktion mit dem Hilfe-Button sowie dessen Auswirkungen.



Abbildung 40: Benutzung der Hilfefunktion  
(e.D.)

Wird der Hilfe-Button aktiviert, erscheinen die Hilfstexte solange, bis der Hilfe-Button erneut selektiert und somit ausgeschaltet wird. Die Hilfstexte bieten eine textuelle Beschreibung der Funktionalitäten der Fingerknöchel-Funktionen, wodurch gerade Einsteiger beim Verstehen der Icons und dessen Auswirkungen unterstützt werden. Beim Testen des Interfaces mit Testfunktionen fiel auf, dass das Hovern und Selektieren aufgrund des Trackings Probleme bereitet. Selektionen wurden ausgeführt, obwohl keine Interaktion stattgefunden hat, Hovereffekte wurden garnicht oder bereits bei einer Entfernung von zwei Handlängen sichtbar, was gegen eine benutzerfreundliche Bedienung gesprochen hat.

Aus dem genannten Grund wurde das Leap-Skript für die Interaktion mit Buttons überarbeitet und eine eigene Lösung entwickelt, die mit Kollisionen arbeitet. Jeder Finger hat eine unsichtbare Kollisionsfläche erhalten, die bei Aufeinandertreffen mit der Kollisionsfläche des dominanten Interaktionsfingers die bereits beschriebenen Feedbackfunktionen auslöst. Die Auslösung der Funktionen konnte dadurch präziser kontrolliert werden als mit dem Leap-Skript, wodurch auch die Fehleranfälligkeit des Interfaces reduziert wurde. Die beschriebene Lösung ist in Abbildung 41 dargestellt.

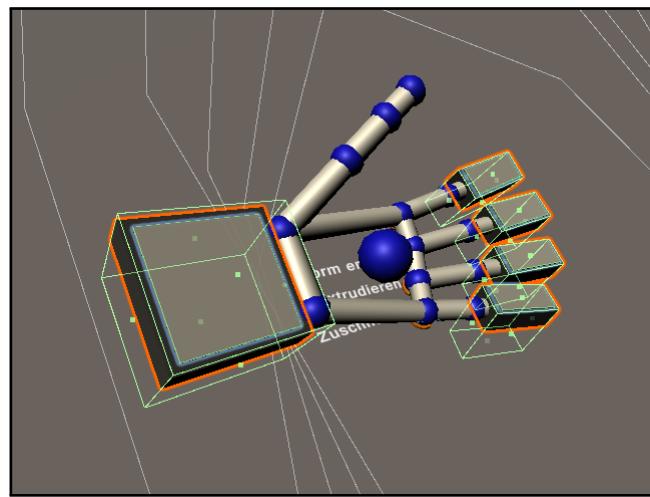


Abbildung 41: Kollisionsflächen der interaktiven UI-Elemente  
(e.D.)

Nach Behebung der Interaktionsschwierigkeiten, konnte mit der Entwicklung der Verknüpfung zwischen den beiden Anwendungen begonnen werden. Da beide Prozesse lokal ausgeführt werden und keine Internetverbindung benötigen, konnte auf webbasierte Lösungen verzichtet werden. Um den Vorteil der Programmierschnittstellen beider Anwendungen zu nutzen, wurde eine Lösung entwickelt, die auf Sockets beruht und eine lokale Verbindung zwischen der FreeCAD- und der Unity-Anwendung herstellt. Aufgrund dessen, dass die Interaktionen mit dem On-body Interface letztendlich Funktionen in der FreeCAD-Anwendung auslösen sollen, fungiert die FreeCAD-Anwendung als Server und die Unity-Anwendung als Client. Die Unity-Anwendung schickt in einem vorgegebenen Millisekunden-Takt Anfragen an die FreeCAD-Anwendung, um der Anwendung mitzuteilen, ob Interaktionen stattgefunden haben oder nicht. Die FreeCAD-Anwendung kann als Server der Unity-Anwendung entsprechende “Update-Calls“ genannte Pakete senden, die bspw. dem Benutzer mitteilen können, ob ein Menü aufgegangen oder bereits geöffnet ist, wodurch auch das Handinterface in der Funktion beeinflusst werden kann, z.B. in dem eine Funktion ausgegraut wird.

Die Interaktion auf dem On-body Interface kommuniziert demnach ein Ereignis per Socketverbindung an die FreeCAD-Anwendung und erhält daraufhin ein Update, bzw. das Ergebnis der Interaktion, z.B. dass ein Körper erstellt wurde, per Socketverbindung zurück.

### 3.2.6 Herausforderungen und Probleme

#### Kalibrierung

Eine der größten Herausforderungen war die Kalibrierung des Projektors und der Leap Motion Sensoren. Beide Geräte haben unterschiedliche Auflösungen und Sichtweiten, weshalb Höhen- und Größenunterschiede nicht zu vermeiden waren. Die Kalibrierung ist auch von der Position der Leap Motion Kamera abhängig, weshalb selbst minutiöse Verschiebungen des Setups zu Neukalibrierungen geführt haben. Dazu kam, dass sich die UI-Elemente in einer Verschiebung des Interfaces in der y-Achse nach oben oder unten aus der Hand herausbewegen, weshalb eine zusätzliche Kalibrierung des Frustums in y-Richtung vorgenommen werden musste. Das führte jedoch wiederum dazu, dass die Kalibrierung der Positionen neu durchgeführt werden musste, da die UI-Elemente nicht mehr auf den Ankerpunkten lagen.

#### Tracking

Als weitere Herausforderung zählt das Tracking und dessen Geschwindigkeit. Die Aktivierung von NVIDIA 3D-Vision sorgte zwar für eine Wiedergaberate von 120 Hertz am Projektor, jedoch ist der Leap Motion Controller nur in der Lage mit maximal 60 FPS zu rendern. Aufgrund dessen war das Tracking zunächst in der Geschwindigkeit eingeschränkt, was sich auf die Usability ausgewirkt hat. Durch eine Anpassung der Anwendungseinstellungen und einem Umweg über das Leap eigene Webinterface konnten jedoch 90 FPS erreicht werden, wodurch die Geschwindigkeit erhöht werden konnte. Beim Tracking war jedoch auch die generelle Tracking-Fähigkeit eine Herausforderung. Denn je nach Winkel, Höhe und Position der Leap Motion Sensoren variierte das Tracking-Ergebnis, bis hin zu einem ausbleibenden Tracking. Hover und Selektions-Erkennung waren ungenau oder blieben vollständig aus. Um das Problem zu lösen wurden u.a. die internen Modi des Leap Motion Controllers auf “head-mounted“ geändert, um eine Top-Down Perspektive zu simulieren, wodurch das Tracking von Handflächen gegenüber Handrücken bevorzugt und dadurch schneller und weniger fehleranfällig dargestellt wurde. Auch im Code wurde in den von Leap mitgelieferten Skripten ein Modus eingestellt, welcher die Anzeige von Handflächen bevorzugt und dadurch das Tracking verbessert.

Dazu kam die Implementation eigener Skripte, um das Tracking positiv zu beeinflussen und die Funktionalität zu korrigieren. Des Weiteren wurde das automatische Ausrichten der Sensoren deaktiviert, was dazu geführt hat, dass die Richtung der Leap Sensoren während der Verwendung des Interfaces nicht zwischen zwei Ausrichtungen wechselt und damit das Tracking neu berechnet wird, sondern die voreingestellten Bedingungen beibehalten werden.

### **Verbindung der Anwendungen**

Die Verbindung zwischen den beiden Anwendungen gehört mit zu den größten Herausforderungen in der technischen Umsetzung, da beide Anwendungen unterschiedliche Sprachen, Frameworks und APIs verwenden. In FreeCAD kam das Problem dazu, dass bei Aktivierung eines Servers als Makro beim Aufruf der Anwendung, der Thread der Anwendung gestoppt wurde und die Anwendung abgestürzt ist. Um das Problem zu lösen wurde eine Multithreading-Lösung implementiert, wodurch der Python-Socket in einem neuen Thread neben dem Hauptthread der Anwendung gestartet wird und somit die Anwendung nicht blockiert. Allerdings ist dadurch während der Ausführung nicht möglich, den Python-Socket zu beenden. Auch auf Seite von Unity musste eine Lösung gefunden werden, Client-Anfragen dauerhaft senden, jedoch auch auf die Interaktionen eines Benutzers reagieren zu können. Dafür wurde ein zusätzliches Objekt mit einem Skript versehen, welches als eine Art Schnittstelle zwischen Handinterface und Unity-Anwendung fungiert.

### **Erweiterbarkeit des Systems**

Die Eigenheit der FreeCAD-Anwendung nur bestimmte, offizielle Python-Module zu unterstützen bzw. von der FreeCAD-Community erstellte Plugins zu verwenden führte dazu, dass die Implementation des Python-Sockets zusätzliche Arbeitszeit in Anspruch genommen hat. Schließlich musste deshalb ein Weg gefunden werden, einen Socketserver zu implementieren, welcher keine zusätzlichen Funktionalitäten abseits des vordefinierten Rahmens beinhaltet. Für den Anwendungsfall dieser Arbeit reichen die gegebenen Bedingungen zwar aus, beschränken jedoch die Erweiterbarkeit des Systems.

### **Fehlerhafte Hardware**

Zu den Problemen zählt auch fehlerhafte Hardware. Der Leap Motion Controller bspw. wurde inmitten der Entwicklung aufgrund von mangelhafter Tracking-Qualität durch defekte Linsen ausgetauscht und durch ein neues Modell ersetzt.

## Inkompatibilitäten

Zu den Problemen kommen auch die Kompatibilitätsprobleme der unterschiedlichen Versionen hinzu, weshalb die im Abschnitt 3.2.5 definierten Programme, Tools und Frameworks einer Abstimmung aufeinander bedurften. Daraus folgte, dass neuere Herangehensweisen oder Module nicht oder nur ansatzweise verwendet werden konnten und auf ältere, dafür etablierte und vollständig geprüfte Versionen zurückgegriffen werden musste.

## Anatomie der Hand

Aufgrund der Anatomie der menschlichen Hand, ist der verfügbare Platz auf einer Hand begrenzt, weshalb die Anordnung von UI-Elementen zu beachten ist. Im Falle der Hilfstexte muss zusätzlich die Größe und Länge der Texte berücksichtigt werden, da Text nach ISO 9241 [Shackel, 2009] eine Mindestgröße von Schriftgrad 11 aufweisen muss, um ausreichend lesbar zu bleiben. Jedoch sollte gleichzeitig kein Symbol überdeckt werden. Auch kann die Hautfarbe zu Problemen in der Lesbarkeit führen, weshalb mehrere Modi zur Darstellung des Interfaces in zukünftigen Iterationen denkbar sind.

### 3.2.7 Limitierungen

Der entwickelte Prototyp, im weiteren Verlauf der Arbeit On-body Interface genannt, ist in der entwickelten Iteration dieser Arbeit für Rechtshänder ausgelegt. Eine explizite Implementation für Linkshänder bedarf eines Umbaus des Grundgerüsts und ist aus Zeitgründen nicht möglich gewesen, wäre jedoch in zukünftigen Iterationen umsetzbar. Eine generelle Bedienbarkeit von Linkshändern ist jedoch nicht ausgeschlossen. Auch funktioniert das System in der ersten Iteration nur mit dem Ultraleap Stereo 170 IR Evaluation Kit, was den potenziellen Einsatz in Unternehmen je nach Hardwarebestand einschränkt. Des Weiteren ist in der entwickelten Iteration keine Anpassung des Projektors im Live-Betrieb möglich, da das entwickelte System ausschließlich mit einer vordefinierten Konfiguration funktioniert. Der beschriebene Aspekt hängt von dem konzipierten Setup ab, könnte jedoch in folgenden Iterationen dynamisch gestaltbar sein. Auch besteht das entwickelte System auf das Vorhandensein einer ansteuerbaren CAD-Schnittstelle, zur Kommunikation der Interaktionen. Eine Standalone- oder Plugin-Variante zum Einbinden in bestehende andere Systeme wäre zukünftig umsetzbar.

### 3.3 Evaluation

#### 3.3.1 Testszenario

Das Testszenario beinhaltete die Erstellung eines Zahnrads, ähnlich dem in Abschnitt 3.2.1 beschriebenen Beispielszenario. Dafür wurden die Funktionen des On-body Interface entsprechend angepasst. Zur Erstellung des Zahnrads im Testszenario, wurde u.a. vorausgesetzt, eine Zahnradskizze zu erstellen, Körper aufzupolstern, diverse Radien zu bemessen und Skizzen zu vertiefen, ähnlich dem Beispielszenario. Zwei der Funktionen sind in FreeCAD nur über hierarchische Menüs erreichbar und mussten für das Testszenario mehrfach benutzt werden. Die von Flaticon importierten CAD-Icons wurden durch die von FreeCAD verwendeten Symbole und Funktionsnamen ausgetauscht, um die Erlernbarkeit und Konsistenz des On-body Interface zu erhöhen. Das daraus entstandene On-body Interface für die Evaluation ist Abbildung 42 zu entnehmen.

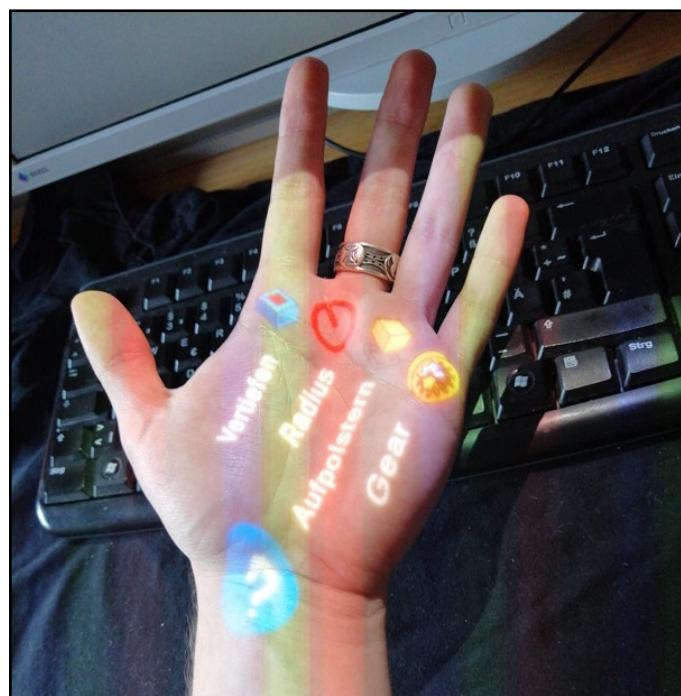


Abbildung 42: On-body Interface für Testszenario  
(e.D.)

### 3.3.2 Aufbau

Das Setup für die Evaluation richtet sich an das Entwicklungs- und Testsystem sowie dessen Ausstattung. Das Setup beinhaltete demnach folgende Komponenten:

- Zwei Monitore zur Darstellung der Programme
- Tablet zur Darstellung von Anleitungen und Informationen
- Isolationsstoff zur besseren Erfassung der Hände
- Universelle Maus und Tastatur
- On-body Interface
- Projektor BenQ W710ST
- Ultraleap Stereo 170 IR Evaluation Kit
- Computer mit Windows 10 Betriebssystem

Das System wurde der Testumgebung nachempfunden und dementsprechend eingerichtet. Eine erneute Kalibrierung oder Anpassung sonstiger Komponenten musste nicht vorgenommen werden. Bei der Evaluation wurde zudem auf Ergonomie geachtet, weshalb zusätzlich höhenverstellbare Stühle zu den justierbaren Monitoren verwendet wurden. In Abbildung 43 ist das beschriebene Setup nochmals symbolisch aufgeführt.

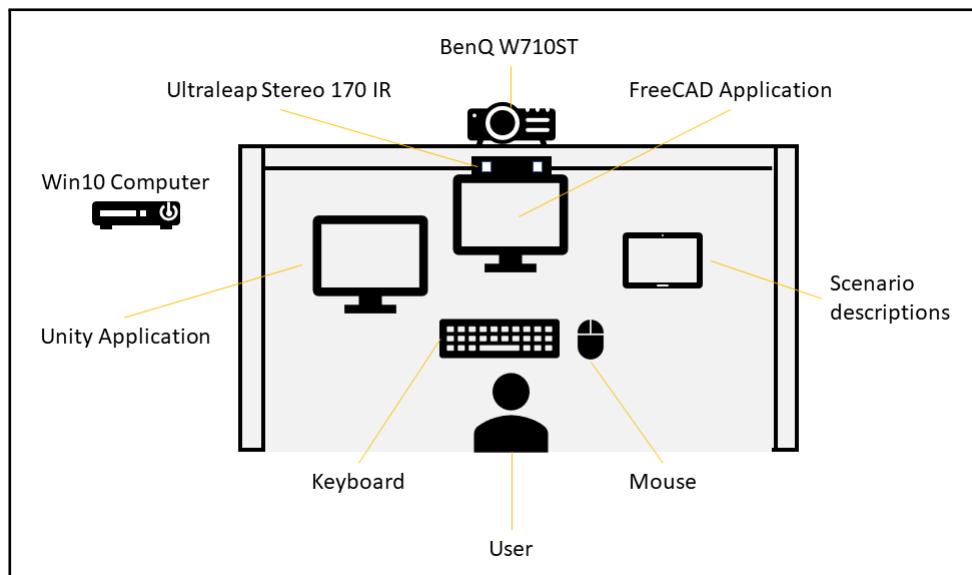


Abbildung 43: Setup des Evaluation-Systems  
(e.D.)

### 3.3.3 Methode

Durch eine Evaluation soll die hedonische Qualität (HQ), sprich die innerliche und äußerliche Qualität, z.B. wie Funktionalitäten implementiert wurden, sowie die pragmatische Qualität (PQ) des entwickelten On-body Interface für den Einsatz im CAD-Umfeld untersucht werden. Eine anschließende Auswertung der Ergebnisse soll Aufschluss darüber geben, wie Probanden das entwickelte System subjektiv im Vergleich zu einer herkömmlichen Vorgehensweise mit Maus und Tastatur (MuT) empfinden und ob und in welchem Maße sich ein On-body Interface für den Einsatz in CAD eignet. Dafür wurde folgende Methodik angewendet:

Ein Proband erhält vorab eine Einführung in das bevorstehende Verfahren, sowie Instruktionen zur Durchführung der Testeinheiten. Für beide Testeinheiten, Maus und Tastatur (MuT) sowie das Arbeiten mit dem On-body Interface wird eine geführte Anleitung bereitgestellt, sodass alle Probanden die gleichen Arbeitsschritte in einer kontrollierten Umgebung durchlaufen. Die Anleitungen werden elektronisch zur Verfügung gestellt, um den Arbeitsbereich frei von Papier oder anderen behindernden Materialien frei zu halten. Nach einer vorher definierten Zeit werden die Systeme getauscht und ein Proband erhält wiederum Zeit für einen zweiten Durchlauf. Die Reihenfolge der Vorgehensweisen, sprich ob zuerst mit dem On-body Interface oder mit Maus und Tastatur (MuT) gearbeitet wird, ist zufällig, sodass keine Beeinflussungen wie Folgeeffekte entstehen.

Nach jedem Durchlauf sollen Probanden den AttrakDiff-Fragebogen [Hassenzahl et al., 2003] ausfüllen, um eine subjektive Einschätzung zur User Experience mit dem entwickelten On-body Interface bezogen auf Bedienung und Aussehen, bzw. mit der vorangegangenen Arbeitsweise abzugeben. Der AttrakDiff-Fragebogen von Hassenzahl et al. [2003] stellt 28 gegenübergestellte Empfindungen zur Auswahl, z.B. isolierend gegenüber verbindend, welche jeweils durch sieben Stufen von -3 bis +3 eingeschätzt werden können. Der AttrakDiff-Fragebogen bietet außerdem die Möglichkeit, nach der Durchführung der Evaluation die Ergebnisse digital auszuwerten und als Diagramme darzustellen. Ein Wortpaar-Beispiel samt Bewertungssystem ist in Abbildung 44 abgebildet.



Abbildung 44: AttrakDiff Wortpaar-Beispiel  
[Hassenzahl et al., 2003]

Des Weiteren wird vor und nach der Benutzung des On-body Interface der Self-Assessment Manikin (SAM)-Fragebogen [Bradley und Lang, 1994] eingesetzt, um das subjektive Befinden eines Probanden zu erfassen. Der SAM-Fragebogen umfasst die drei Dimensionen “Freude“, “Erregung“ und “Dominanz“, welche je nach Version durch fünf oder neun dargestellte Manikins skaliert werden, wie in Abbildung 45 einzusehen.

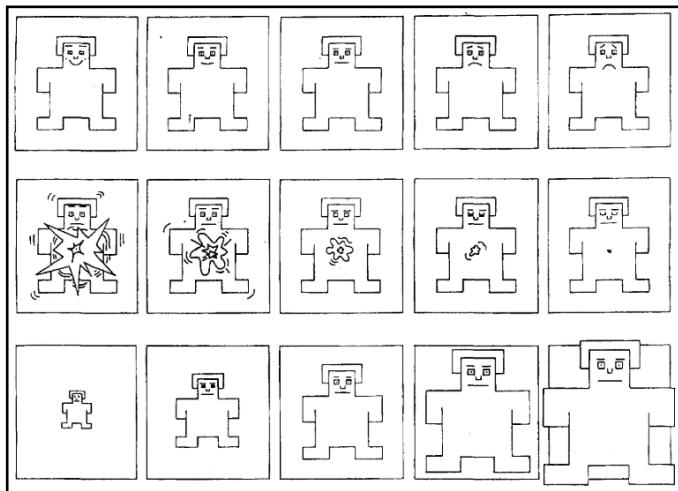


Abbildung 45: Dimensionen des SAM-Fragebogens  
[Bradley und Lang, 1994]

Die Dimension “Freude“ bspw. reicht von einem fröhlichen bis hin zu einem traurigen Manikin, “Erregung“ von einem aufgewühlten bis hin zu einem ruhigen und “Dominanz“ von einem kleinen bis hin zu einem großen, ausfüllenden Manikin. Jede Dimension wird von -2 bis +2 bewertet, was durch die Auswahl der Manikins repräsentiert wird. Nach dem Zusammenzählen aller Werte einer Dimension, bspw. vor der Benutzung des On-body Interface, wird ein Mittelwert gebildet. Der berechnete Mittelwert dient dem Vergleich vor und nach der Benutzung des On-body Interface und gibt Aufschluss darüber, inwiefern sich das On-body Interface auf den Gefühlszustand eines Probanden ausgewirkt hat.

Um auch Aussagen über die Usability treffen und spätere Iterationen optimieren zu können, wird zusätzlich die Methode “Lautes Denken“ nach [Frommann, 2005] angewendet. Dabei wird u.a. von einem Probanden verlangt, alle Gedanken und Handlungen laut zu äußern. Welche Informationen dabei wichtig und wie Gedanken und Handlungen zu äußern sind, wird einem Probanden vorab erläutert. Eine Anregung zum lauten Denken während eines Durchlaufes kann bei Bedarf gegeben werden. Die geäußerten Gedanken und Handlungen werden wie von Frommann [2005] vorgegeben schriftlich mit Zeitstempel festgehalten.

Als Zielgruppe dienen volljährige Menschen zwischen 18 und 67 Jahren, mit aller Art von Vorerfahrungen im CAD-Bereich, um auch einen eventuellen Unterschied zwischen Novizen und Experten ableiten zu können. Getestet werden soll immer nur ein Proband gleichzeitig, sodass auch nonverbale Reaktionen unter voller Konzentration erfasst werden können.

Lautes Denken der Probanden soll helfen, die internen Prozesse bei der Benutzung des On-body Interface besser verstehen zu können. Probanden erhalten vor Ort Verpflegung und eine Vergütung für die Teilnahme an der Evaluation in der Art von Gutscheinen für digitale Plattformen. Für das Einführen eines Probanden, das Bearbeiten beider Szenarien sowie das Beantworten der beschriebenen Fragebögen wird eine Gesamtbearbeitungszeit von 45 bis 60 Minuten vorgegeben. Hilfestellung wird nur im Falle eines Systemfehlers oder einer Sackgassen-Situation angeboten. Die Testumgebung befindet sich an einem isolierten Arbeitsplatz mit einer Sonnen-unabhängigen Beleuchtung, um ein neutrales Tracking zu ermöglichen. Um die Evaluation organisatorisch zu planen, wird ein Terminkalender angelegt, in dem sich ein Proband für einen Zeitslot anonym eintragen kann.

### **3.3.4 Durchführung**

Zunächst wurde jeder an der Evaluation teilnehmende Proband bei Anfang des eingeplanten Zeitslots am Eingang des Veranstaltungsortes herzlich begrüßt und zur Testumgebung geführt. Vor Antritt der Bearbeitung wurde jedem Probanden eine Einwilligungserklärung zum Datenschutz ausgehändigt, welche von jedem Probanden separat unterschrieben werden musste. Für jeden Probanden wurde zusätzlich ein Formular für die Vergütung übergeben, welches bei Bedarf unterzeichnet werden konnte, um an der Verlosung von Gutscheinen teilzunehmen.

Nach Unterzeichnung der Einwilligungserklärung und optional des Vergütung-Formulars wurde eine Stoppuhr für die Zeiterfassung gestartet. Am Arbeitsplatz bekam jeder Proband daraufhin Instruktionen für den Ablauf der Evaluation, darunter bspw. was zu tun ist, wenn ein Proband sich schlecht fühlt oder bei einem Aufgabenschritt nicht weiterkommen sollte. Außerdem wurde auf neutrale Lichtverhältnisse geachtet und Störfaktoren wie Reflektionen oder laute Geräusche beseitigt.

Mit Beendigung der Unterrichtung erhielt jeder Proband ein Einführungsschreiben auf einem Tablet präsentiert, welches u.a. nochmals über die angesetzte Dauer der Evaluation und den konkreten Ablauf der Szenarien, sowie über die eingesetzten Fragebögen aufklärt. Nach erfolgreichem Durchlesen des Einführungsschreibens bekam ein Proband einen von zwei Anleitungsbögen auf einem Tablet eingeblendet, welches der Proband selbst bedienen musste.

Dabei wurde eine Markierung eingefügt, zu welcher ein Proband lesen und anschließend eine kurze Meldung machen soll, sodass über die aufgeführten Informationen diskutiert werden kann. Je nach Vorgehensweise wurde ein Proband nach getätigter Meldung an die Arbeitsumgebung herangeführt. Kommuniziert wurden daraufhin Erläuterungen zur CAD-Anwendung sowie zur Peripherie und gegebenenfalls zum On-body Interface und dessen Eigenheiten in der Bedienung.

Beim Durchlauf mit dem On-body Interface wurde vor Beginn und nach Ende der Bearbeitung der SAM-Fragebogen ausgehändigt, um die subjektive Gefühlslage eines Probanden zu erfassen. Um Probanden nicht bei der Bearbeitung zu beunruhigen, wurde eine Position hinter den Probanden außer Sichtweite, jedoch in Hörweite eingenommen. Bei Verstummen eines Probanden wurde auf das laute Denken durch offene Fragen hingewiesen. Die Szenarien wurden durch Startsignale eingeleitet und beendet. Das Durchlaufen eines Szenario-Schrittes eines Probanden kann Abbildung 46 entnommen werden.

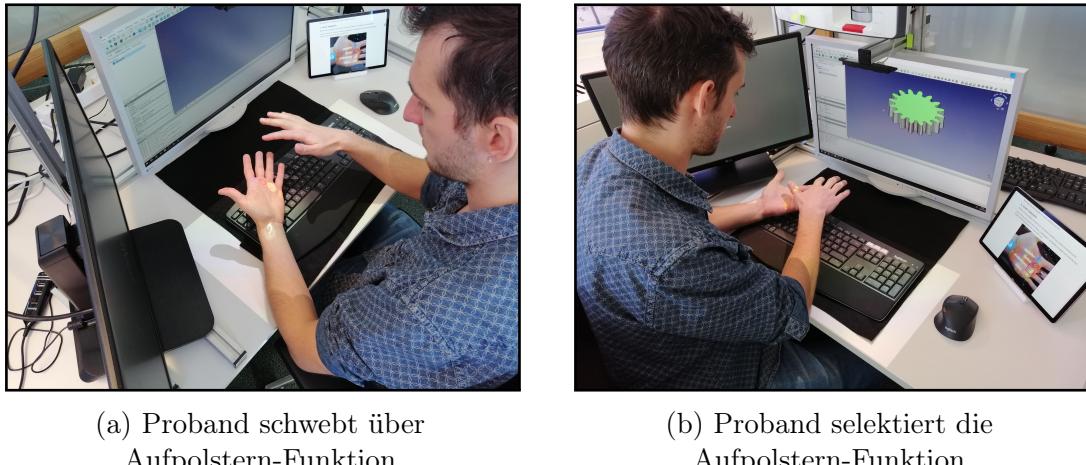


Abbildung 46: Probandentest des On-body Interface

Nach Beendigung eines Durchlaufes wurde für die Bearbeitung gedacht und einer der beiden AttrakDiff-Fragebögen je nach absolviertem Durchlauf, digital in einem Webbrowser zur Verfügung gestellt. Der aktive Proband wurde daraufhin gebeten den aufgeführten Fragebogen zu beantworten und anschließend eine kurze Meldung zu machen. Nach Abschluss des ersten Fragebogens wurde der zweite Durchlauf auf einem Tablet eingeblendet und der aktive Proband gebeten, wieder bis zu einer gesetzten Markierung zu lesen und bei Unklarheiten Fragen zu stellen. Die Bearbeitung des zweiten Durchlaufes wurde nach erfolgreichem Durchlesen bis zur angesetzten Markierung durch ein Startsignal eingeleitet.

Mit Abschluss des letzten Arbeitsschrittes des zweiten Durchlaufes wurde nochmals der jeweilige AttrakDiff-Fragebogen in einem Webbrowser zur Beantwortung freigegeben. Nach Beantwortung des zweiten Fragebogens wurden die Probanden auf die erfolgreiche Absolvierung der Evaluation hingewiesen, die Stoppuhr angehalten, die Zeiten erfasst, sowie für die investierte Zeit gedankt. Abschließend wurde jeder Proband nach der Evaluation zum Ausgang begleitet und freundlich verabschiedet.

### 3.3.5 Ergebnisse

Das System wurde im A/B-Verfahren mit insgesamt 14 Probanden getestet. Unter den 14 Probanden befanden sich zwölf Männer und zwei Frauen. Das Durchschnittsalter aller Probanden belief sich auf 28 Jahre, der jüngste Teilnehmer war 22 Jahre jung. Keiner der Probanden kannte das entwickelte System, die Systemumgebung oder die Aufgaben vor dem Test.

#### Zeitliche Erfassung

Sieben Probanden wurden zuerst mit MuT und anschließend mit dem On-body Interface getestet. Fünf der sieben Probanden, die zuerst mit MuT gearbeitet haben, wiesen beim darauffolgenden Test mit dem On-body Interface eine durchschnittlich schnellere Bearbeitungszeit von 2 Minuten und 57 Sekunden auf. Die Probanden, die zuerst mit MuT und danach mit dem On-body Interface gearbeitet haben, waren am Ende mit dem On-body Interface im Durchschnitt um 24 Sekunden schneller. Hingegen die Probanden, die zuerst mit dem On-body Interface gearbeitet und danach das MuT-Vorgehen durchlaufen haben, wiesen eine um 6 Minuten und 25 Sekunden langsamere durchschnittliche Bearbeitungszeit mit dem On-body Interface gegenüber MuT auf. Von 14 Probanden haben fünf Probanden die Aufgaben mit dem On-body Interface gegenüber MuT schneller bearbeiten können. Auf alle Probanden gerechnet, dauerte die Bearbeitung der Aufgaben mit dem On-body Interface im Durchschnitt drei Minuten länger als mit MuT. Die Rohdaten der Zeiterfassung können Abbildung 47 entnommen werden.

Nummer	M+T first	Geschlecht	Alter	M+T Los	M+T Ende	H+M+T Los	H+M+T Ende	Gesamt	M+T Gesamt	H+M+T Gesamt	Wieviel mehr/weniger
001	1	m	27	00:06:15	00:23:50	00:38:55	01:06:00	82	00:17:35	00:27:05	00:09:30
002	1	w	31	00:05:15	00:16:40	00:26:57	00:40:45	56	00:11:25	00:13:48	00:02:23
003	0	m	29	00:36:17	00:48:40	00:13:55	00:34:20	60	00:12:23	00:20:25	00:08:02
004	1	m	30	00:05:45	00:15:59	00:24:52	00:34:47	43	00:10:14	00:09:55	00:00:19
005	0	m	25	00:21:50	00:26:40	00:07:40	00:17:15	28	00:04:50	00:09:35	00:04:45
006	1	m	28	00:05:52	00:18:08	00:31:08	00:37:51	43	00:12:16	00:06:43	00:05:33
007	0	m	22	00:24:06	00:28:40	00:11:08	00:19:50	31	00:04:34	00:08:42	00:04:08
008	1	m	28	00:05:29	00:14:41	00:28:55	00:34:24	37	00:09:12	00:05:29	00:03:43
009	0	m	25	00:26:41	00:33:55	00:13:53	00:23:46	37	00:07:14	00:09:53	00:02:39
010	1	m	29	00:04:32	00:13:45	00:21:09	00:27:15	32	00:09:13	00:06:06	00:03:07
011	0	m	25	00:33:40	00:38:40	00:08:54	00:28:36	42	00:05:00	00:19:42	00:14:42
012	1	m	33	00:03:43	00:11:23	00:23:20	00:28:58	33	00:07:40	00:05:38	00:02:02
013	0	m	34	00:34:14	00:43:00	00:13:32	00:27:47	46	00:08:46	00:14:15	00:05:29
014	0	w	25	00:34:37	00:42:50	00:19:13	00:32:38	46	00:08:13	00:13:25	00:05:12

Abbildung 47: Rohdaten der Probanden-Zeiterfassung

## Lautes Denken

Alle Probanden haben Aussagen zum On-body Interface und zum MuT-Vorgehen während der Bearbeitung der jeweiligen Szenarien getätigt. Ton- oder Videoaufnahmen waren nicht gestattet, weshalb sich die folgenden Daten rein auf Protokolle mit Zeitstempel beziehen. Die erfassten Aussagen sind nach Szenario und Stimmung, sprich ob positiv oder negativ gestimmt, sowie farblich unterteilt und beschreiben zusätzlich, unter welchem Aspekt eine Aussage getroffen wurde. Die Aussagen wurden im O-Ton niedergeschrieben und übernommen, sowie kategorisch sortiert. Eine Aussage wird zudem zeilenweise der entsprechenden Probandennummer zur Nachvollziehbarkeit zugeordnet. Jede der Tabellen enthält Besonderheiten, auf die explizit eingegangen wird. Die positiven Probanden-Aussagen bei der Bearbeitung des On-body Szenarios sind in Tabelle 9, die negativen Probanden-Aussagen in Tabelle 10 aufgelistet. Getätigte Aussagen zum MuT-Vorgehen mit positiver Stimmung sind in Tabelle 11, negativ gestimmte Aussagen in Tabelle 12 aufgeführt.

Nr.	Positive Aussagen: On-body Interface	Aktion
001	Wow, das ist wirklich idiotensicher	Zahnrad selektieren
005	Ah so funktioniert das	Zahnrad selektieren
007	Verschickt, ich tippe drauf und es passiert was, sehr cool	Zahnrad selektieren
008	Oh das war ja einfach	Zahnrad selektieren
011	Der Sound gefällt mir richtig gut	Zahnrad selektieren
012	Hä...aaah	Zahnrad selektieren
013	Perfekt, hat ja super geklappt	Zahnrad selektieren
003	Sieht sehr interessant aus	Menü aktivieren
005	Fancy, uh sick	Menü aktivieren
009	Hehe cool	Menü aktivieren
003	Ah hat er schon gemacht, okay	Vertiefung selektieren
007	Hmm ah okay	Vertiefung selektieren
009	Ah der hat das schon gemacht	Vertiefung selektieren
011	Vertiefen geht gut	Vertiefung selektieren
004	Ach das funktioniert, cool	Aufpolstern selektieren
006	Der hat das schon gemacht, okay	Aufpolstern selektieren

Nr.	Positive Aussagen: On-body Interface	Aktion
008	Zack, so schnell geht's	Aufpolstern selektieren
009	Am Anfang war ich skeptisch, aber das ist ganz intuitiv so	Aufpolstern selektieren
012	Woah...nett	Aufpolstern selektieren
013	Das ist ja lustig	Aufpolstern selektieren
014	Nice, cool	Aufpolstern selektieren
005	Das bewegt sich ja mit, cool	Hand bewegen
007	Uh, ah jetzt	Radius selektieren

Tabelle 9: Positive Probanden-Aussagen zum On-body Interface Test

Aus Tabelle 9 geht hervor, dass sieben von 14 Probanden eine positive Aussage zur Zahnrad-Funktion auf dem On-body Interface kommuniziert haben. Drei von 14 Probanden äußerten sich positiv über die Aktivierung des On-body Interface. Vier Probanden hinterließen eine positive Bemerkung zur Vertiefung-Funktion auf der Hand. Sieben positive Aussagen wurden zur Aufpolstern-Funktion erfasst. Ein Proband äußerte sich positiv zur Erfassung der Hände. Ebenfalls sprach sich ein Proband positiv für die Radius-Funktion aus. Die Zahnrad- sowie die Aufpolstern-Funktion verzeichnen jeweils sieben positive Äußerungen von sieben unterschiedlichen Probanden.

Tabelle 10 verdeutlicht die negativen gestimmten Aussagen zur Bedienung des On-body Interface bei der Bearbeitung des entsprechenden Szenarios. Zehn von 14 Probanden kommunizierten eine negative Aussage zur Erfassung der Hände, bzw. zur Tracking-Qualität des Systems. Zwei Probanden äußerten sich sogar zwei bzw. drei Mal negativ zur Tracking-Qualität. Ein Proband machte eine negative Aussage zur Selektion der Vertiefung-Funktion. Vier Probanden äußerten eine negativ gestimmte Aussage zur Funktionsweise der Radius-Funktion. Die Tabelle weist eine Dominanz des Tracking-Aspektes, gegenüber der Implementation der Funktionen auf.

Nr.	Negative Aussagen: On-body Interface	Aktion
001	Ich schweben nur, warum führt er die Funktion aus?	Trackingprobleme
002	Hä, das geht nicht? Komisch	Trackingprobleme
003	Ne ich will doch zum Radius	Trackingprobleme
003	Warum nimmt er das nicht	Trackingprobleme
003	Ich glaube ich halte meine Hand falsch	Trackingprobleme
004	Das will er grad nicht	Trackingprobleme
006	Er erkennt nicht so gut, ob ich schweben oder drauf bin	Trackingprobleme
007	Überlagern darf ich nicht, okay	Trackingprobleme
009	Ich glaube er hat das grad ein bisschen früher gemacht als ich drauf war	Trackingprobleme
011	Er wählt nicht das aus was ich will	Trackingprobleme
013	Der Mittelfinger ist bisschen schwierig auszuwählen	Trackingprobleme
013	Das ist bisschen zittrig gewesen	Trackingprobleme
014	Ich schaue immer auf den Bildschirm was getrackt wird, weil das Tracking so schwammig ist	Trackingprobleme
005	Oh das ist bisschen schwer auszuwählen	Vertiefung selektieren
002	Hat das jetzt geklappt?	Radius selektieren
003	Bin ich jetzt falsch?	Radius selektieren
005	Ist es jetzt ausgewählt?	Radius selektieren
008	Ich hätte jetzt erwartet, dass das Werkzeug sofort kommt	Radius selektieren

Tabelle 10: Negative Probanden-Aussagen zum On-body Interface Test

Die positiven Aussagen zum MuT-Vorgehen in Tabelle 11 fallen gegenüber den positiv gestimmten Aussagen zum On-body Interface in Tabelle 9 kürzer aus. Drei von 14 Probanden äußerten sich positiv über die Aufpolstern-Funktion in der Symbolleiste. Zwei Probanden machten positive Aussagen zur Vertiefung-Funktion, welche ebenfalls in der Symbolleiste zu finden war. Es wurden keine positiven Aussagen zur Radius- oder Zahnrad-Funktion kommuniziert.

Nr.	Positive Aussagen: Maus und Tastatur	Aktion
005	Das ist easy	Aufpolstern selektieren
006	Das wars jetzt schon, ah okay	Aufpolstern selektieren
008	Zack, easy	Aufpolstern selektieren
008	Jup, okay versteh ich	Vertiefung selektieren
012	Ich habe keine Probleme Funktionen zu finden	Vertiefung selektieren
012	Crazy, cool	Vertiefung selektieren

Tabelle 11: Positive Probanden-Aussagen zum Maus und Tastatur Test

Tabelle 12 hingegen umfasst die negativ gestimmten Aussagen der Probanden zum MuT-Vorgehen. Fünf von 14 Probanden äußerten sich demnach negativ zur Suche der Zahnrad-Funktion in der Menüleiste. Ebenfalls kommunizierten fünf Probanden, zwei davon auch mehrfach eine negative Äußerung zur Suche der Radius-Funktion in der geschachtelten Menüleiste. Ein Proband äußerte sich negativ zum Nichtvorhandensein eines Shortcuts für die Radius-Funktion. Die Aufpolstern- und Radiusfunktion waren jeweils nur über hierarchische Menüs zu erreichen.

Nr.	Negative Aussagen: Maus und Tastatur	Aktion
001	InvoluteGear? Wo ist das denn	Zahnrad suchen
006	Finde InvoluteGear grad nicht	Zahnrad suchen
009	Oh das ist viel aufwändiger	Zahnrad suchen
011	Wo ist die Funktion?	Zahnrad suchen
014	Bei so Menüs muss ich immer bisschen länger suchen	Zahnrad suchen
005	Oh das ist actually umständlicher so	Radius suchen
009	Diese tiefen Menüs finde ich komisch	Radius suchen
010	Puh das ist anstrengend	Radius suchen

Nr.	Negative Aussagen: Maus und Tastatur	Aktion
011	Sketch hätte ich nicht gefunden	Radius suchen
011	Diese tiefen Menüs was soll das	Radius suchen
013	Haiaiai zugänglich ist anders	Radius suchen
013	Das hat ja nicht mal nen Shortcut	Radius suchen

Tabelle 12: Negative Probanden-Aussagen zum Maus und Tastatur Test

### Feedback der Probanden

Unter den Aussagen wurde auch Feedback zum entwickelten On-body Interface sowie zum Vorgehen mit MuT geäußert. Das Feedback wird wiederum in positives und negatives Feedback unterteilt. Das Feedback wurde während und nach der Bearbeitung der Szenarien ohne Aufforderung von den Probanden freiwillig abgegeben. Positiv gestimmtes Feedback ist in Tabelle 13, negatives Feedback in Tabelle 14 aufgelistet.

Nr.	Positives Feedback zum On-body Interface
008	Sehr schön gemacht, gefällt mir sehr gut
008	Auch die Symbole und das Feedback sind gut
001	Das ist wirklich eine coole Idee
003	Ist schon geil, viel schneller als normal hätte ich früher gebrauchen können
003	Cool, dass ich keine Menüs mehr brauche
006	Ich finde es einfacher, da man alles was man braucht auf der Hand hat
007	Ich sehe großes Potenzial gerade für so komplizierte oder versteckte Funktionen
008	Sehr gut, dass die sonst versteckten Funktionen sofort verfügbar sind
009	Ich denke auf der Hand zu lernen ist einfacher, da man nicht von Menüs erschlagen wird
014	Die Hilfe finde ich mega nützlich

Tabelle 13: Positives Feedback zum On-body Interface

Nach Tabelle 13 äußerten sieben von 14 Probanden positives Feedback zum entwickelten On-body Interface. Fünf der sieben Probanden sprachen dabei explizit das Wegfallen von Menüs bzw. die sofortige Verfügbarkeit von versteckten Funktionen an. Ein Proband empfand die Hilfe-Funktion als nützlich. Zwei der sieben Probanden gaben ein positives Feedback zur Implementation der Symbole und des Interaktion-Feedbacks. Zwei Probanden lobten das On-body Interface allgemein.

Tabelle 14 hingegen zeigt das negative Feedback zum entwickelten On-body Interface auf. Auch das negative Feedback wurde freiwillig ohne Aufforderung geäußert.

<b>Nr.</b>	<b>Negatives Feedback zum On-body Interface</b>
001	Es sollte besser funktionieren
002	Schade, dass das Tracking so schlecht ist
004	Das Tracking sollte definitiv überarbeitet werden
004	Animationen wären gut, die anzeigen, dass man seine Hände anders rotieren muss
006	Das Tracking ist schade, dass es so schlecht manchmal funktioniert
009	Die Höhe zu finden wo es gut projiziert, war anfangs bisschen komisch
014	Dass die Symbole nicht ganz passen stört mich
014	Wenn das Tracking gut funktionieren würde, dann fände ich es praktisch
001	Einhändige Bedienung wäre besser, dann muss man nicht von der Maus weg
002	Einhändig wär besser, das wäre einfacher
009	Könnte mir einhändige Interaktion cooler vorstellen
007	Ich fände es auf dem Handrücken ohne Drehung besser
012	Ich finde es ein sensory overload, Ich hab Maus, Tastatur und Hand, das ist viel

Tabelle 14: Negatives Feedback zum On-body Interface

Sechs von 14 Probanden haben ein negatives Feedback zur Tracking-Qualität abgegeben. Drei Probanden merkten an, eine einhändige Bedienung aufgrund der einfacheren Handhabung zu bevorzugen. Ein Proband würde das On-body Interface statt auf der Handfläche auf dem Handrücken projizieren. Ebenfalls äußerte ein Proband ein negatives Feedback zum Arbeiten mit dem On-body Interface allgemein und kommunizierte, dass das Vorgehen mit drei Eingabegeräten ein “sensory overload“ wäre.

### **SAM-Fragebögen**

Jeder der 14 Probanden hat jeweils vor und nach der Benutzung des On-body Interfaces einen SAM-Fragebogen ausgefüllt. Relevant dabei war, ob sich der Gefühlszustand eines Probanden durch die Benutzung des On-body Interfaces bei der Bewältigung der vorgegebenen Aufgaben in den drei Dimensionen “Freude“, “Erregung“ und “Dominanz“ geändert hat. Nicht jeder Proband konnte eine Angabe zu allen Dimensionen tätigen, wodurch nicht alle Dimensionen gleich gewertet werden konnten. Für die Dimension “Freude“ haben 12 von 14, für die Dimension “Erregung“ 4 von 14 und für die Dimension “Dominanz“ 5 von 14 Personen Angaben gemacht. Der dabei berechnete Mittelwert ist entscheidend für die Beurteilung des Einflusses auf die Gefühlslage eines Probanden, ausgehend vom On-body Interface.

Die errechneten Mittelwerte vor Benutzung des On-body Interface belaufen sich auf 1.50 für die Dimension “Freude“, 4.67 für die Dimension “Erregung“ und 3.0 für die Dimension “Dominanz“. Nach der Benutzung des On-body Interface wurde für die Dimension “Freude“ ein Mittelwert von 1.60, für die Dimension “Erregung“ ein Mittelwert von 3.50 und für die Dimension “Dominanz“ ein Mittelwert von 4.25 ermittelt. Für die Dimension “Freude“ hat sich der Mittelwert um 0.10 erhöht, für die Dimension “Erregung“ um 1.17 verringert und für die Dimension “Dominanz“ um 1.25 erhöht.

### **AttrakDiff-Fragebögen**

Der AttrakDiff-Fragebogen zur Erfassung der subjektiven Einschätzung bezüglich Bedienung und Aussehen des On-body Interfaces im Vergleich zum MuT wurde ebenfalls von allen 14 Probanden jeweils nach einem Szenario-Durchlauf ausgefüllt. Die dabei entstandenen Ergebnisse und Diagramme werden sukzessive aufgeführt und beschrieben.

Die Portfolio-Darstellung veranschaulicht die Ausprägungen der hedonischen Qualität (HQ) sowie der pragmatischen Qualität (PQ) beider getesteten Systeme. Die hedonische Qualität (HQ) erstreckt sich über die vertikale, die pragmatische Qualität (PQ) über die horizontale Achse. Gewertet wird jeweils von -3 (unten/links) bis +3 (oben/rechts) für beide Ausprägungen. Ein perfektes Produkt würde demnach sowohl in der HQ als auch der PQ einen Wert von +3 bzw. 3.0 aufweisen und damit in der Auswertung oben rechts liegen. Je nach Ausprägung der beiden Dimensionen, fallen die Systeme in einen oder mehrere Charakterbereiche. Die Größe des Konfidenz-Rechtecks gibt dabei an, wie hoch die Sicherheit für eine Einordnung eines Systems in einen gewissen Bereich ausfällt. Zusätzlich wird durch die Konfidenz die generelle Einigkeit der Probanden bei der Beurteilung eines Systems verdeutlicht. In Abbildung 48 ist die Portfolio-Darstellung beider Systeme einzusehen.

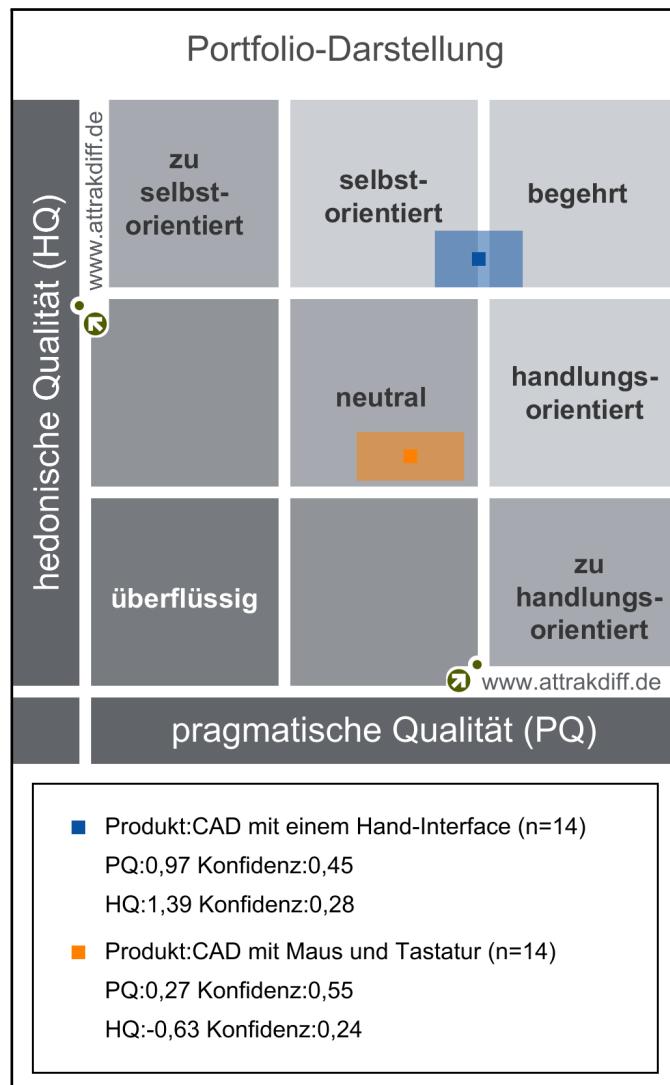


Abbildung 48: AttrakDiff Ergebnis: Portfolio-Diagramm

Das On-body Interface erhielt in der pragmatischen Ausprägung bei 14 Teilnehmern einen Wert von 0.97, bei einer Konfidenz von 0.45. Die HQ des On-body Interfaces wurde mit 1.39 bei einer Konfidenz von 0.28 bewertet. Das On-body Interface fällt dadurch in die Charakterbereiche selbstorientiert und begehrte mit ausgewogener Tendenz. Das MuT-Vorgehen erhielt einen Wert von 0.27 für die PQ bei einer Konfidenz von 0.55, sowie -0.63 in der HQ, bei einer Konfidenz von 0.24. Das MuT-Vorgehen fiel somit in den neutralen Charakterbereich, mit negativer Tendenz in der HQ. Deutlich ist der Unterschied der PQ und HQ beider Systeme von 0.7 bzw. 2.02 sowie Konfidenzunterschiede von 0.1 respektive 0.04.

Das Diagramm der Mittelwerte stellt die mittleren Ausprägungen der Dimensionen des AttrakDiff von -3 bis +3 dar. Die HQ wird dabei zusätzlich in den Punkten Stimulation (HQ-S) und Identität (HQ-I) unterschieden. Stimulation bedeutet, inwieweit ein Proband das Gefühl entwickelt hat, sich weiterentwickeln und das Produkt weiterhin benutzen zu wollen, Identität hingegen, inwiefern sich ein Proband mit einem System identifizieren konnte. Die generelle Attraktivität (ATT) wird ebenfalls abgebildet. Das Diagramm ist in Abbildung 49 aufgeführt.

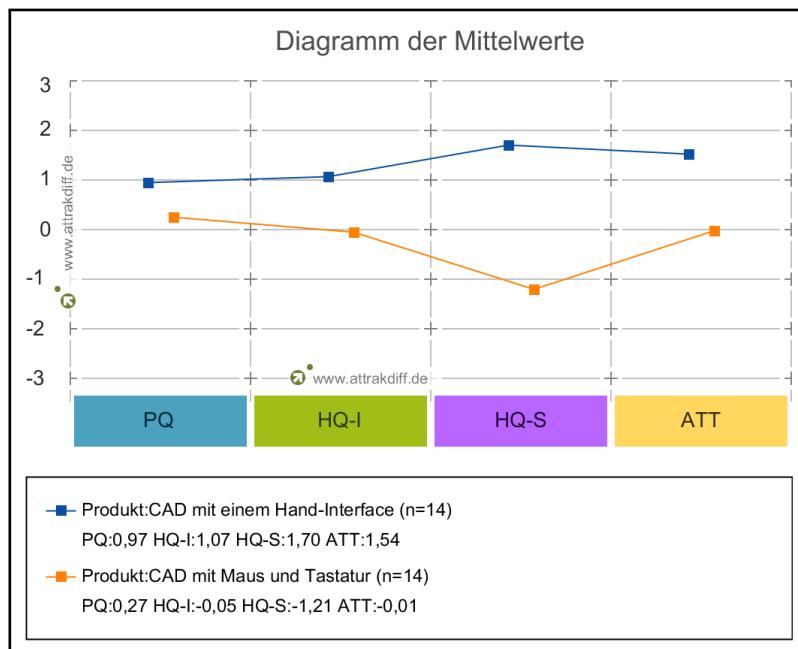


Abbildung 49: AttrakDiff Ergebnis: Diagramm der Mittelwerte

Die Werte der PQ entsprechen denen des Portfolio-Diagramms. Der Wert der Identität für das On-body Interface belief sich auf einen Mittelwert von 1.07, die Stimulation auf einen Mittelwert von 1.70. Die Attraktivität des On-body Interface wies einen durchschnittlichen Wert von 1.54 auf.

Der Mittelwert für die Identität beim MuT-Vorgehen wurde mit -0.05, die Stimulation mit -1.21 und somit negativ tendiert bewertet. Die generelle Attraktivität des MuT-Vorgehens erhielt eine durchschnittliche Wertung von -0.01. Demnach konnten sich die Probanden eher mit dem On-body Interface identifizieren und fühlten sich zusätzlich mit einer positiven Tendenz gegenüber dem MuT-Vorgehen stimuliert. Ebenfalls wurde die Attraktivität des On-body Interface mit einem Unterschied von 1.53 positiver gegenüber MuT bewertet. Im Profil der Wortpaare in Abbildung 50 sind die Mittelwerte jedes Wortpaars des AttrakDiff-Fragebogens bezüglich der untersuchten Systeme dargestellt.

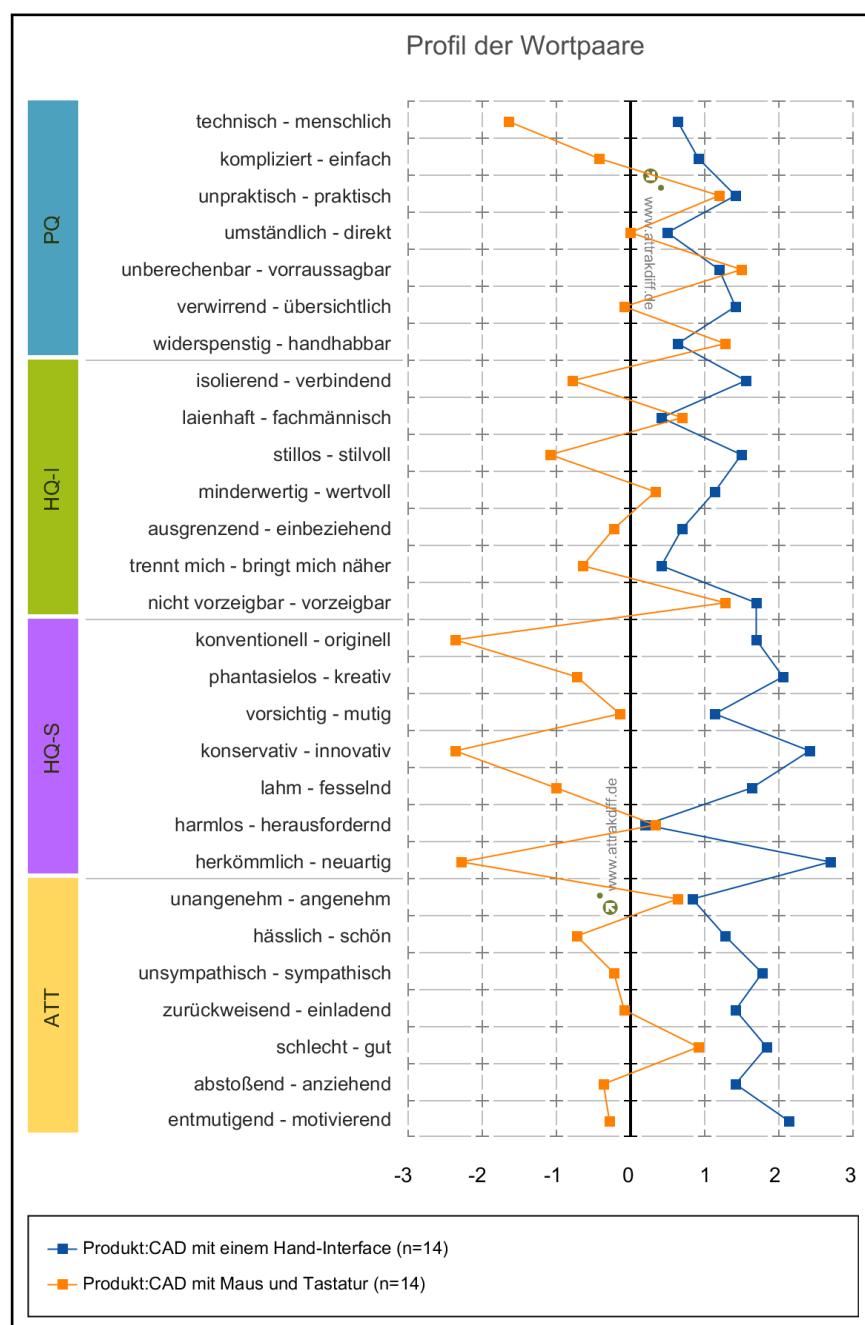


Abbildung 50: AttrakDiff Ergebnis: Profil der Wortpaare

Wie auch beim Diagramm der Mittelwerte sind die vier Bereiche PQ, HQ-I, HQ-S und ATT abgebildet. Interessant sind dabei Extremwerte, die angeben, welche Eigenschaften besonders kritisch oder besonders gut gelöst sind. Die Wortpaare wurden durch ein siebenstufiges Wertungs-System von minimal -3 bis maximal +3 bewertet. Daraus sind die mittleren Ausprägungen aller Wortpaare entstanden. Auffällig im Bereich PQ war die technische Tendenz des MuT-Vorgehens mit einem Wert von -1.7 sowie kein unter neutral liegender Mittelwert des On-body Interface.

Auch im Bereich HQ-I wurden keine negativen Wertungen für das On-body Interface errechnet. Lediglich in einem Punkt ist der Mittelwert des On-body Interface, bezogen auf den Identität-Gesichtspunkt, unter dem Mittelwert des MuT-Vorgehens. Den stärksten negativen Mittelwert verzeichnet das MuT-Vorgehen im Punkt stillos-stilvoll mit einem Wert von -1.1.

Im Bereich HQ-S ist eine extreme Ausprägung des MuT-Vorgehens beim Wortpaar konventionell-originell mit einem Wert von -2.4 zu verzeichnen. Im Punkt konservativ-innovativ wies das On-body Interface einen Mittelwert von +2.4 gegenüber dem MuT-Vorgehen mit -2.4 auf. Noch extremer fiel die Differenz der beiden Systeme im Punkt herkömmlich-neuartig aus. Dabei wurde für das On-body Interface ein Mittelwert von +2.7 und für das MuT-Vorgehen ein Mittelwert von -2.2 errechnet. Die Differenz betrug somit insgesamt 4.9 und war damit die stärkste Differenz zweier Ausprägungen im gesamten Fragebogen. Im Bereich HQ-S wurde ebenfalls kein negativer oder neutraler Wert für das On-body Interface ermittelt. Das On-body Interface lag im Bereich HQ-S in einem Punkt unter dem Mittelwert des MuT-Vorgehens.

Die ATT-Werte des On-body Interface wurden gegenüber dem MuT-Vorgehen durchgehend positiver bewertet. Den stärksten Mittelwert verzeichnete das On-body Interface im Punkt entmutigend-motivierend mit einer Wertung von +2.1. Die stärkste positive Ausprägung vom MuT-Vorgehen fiel auf den Punkt schlecht-gut mit einer Wertung von +0.9.

### **3.3.6 Geltungsbereich**

Die Ergebnisse beziehen sich auf Personen, die Affinitäten mit CAD aufgewiesen haben und mit der verwendeten CAD-Umgebung noch keine Erfahrungen gemacht hatten. Auch wurde kein Vorab-Training für die Bedienung des On-body Interfaces oder der CAD-Anwendung durchgeführt sowie keine Pausen zwischen den Szenarios eingelegt. Alle Probanden benutzten das On-body Interface zum ersten Mal. Alle Probanden erhielten Anleitungen, die Informationen zur Bedienung der CAD-Anwendung, der Systeme und dem Vorgehen zur Erfüllung der gestellten Aufgaben beinhalteten und hatten somit Anhaltspunkte und Hilfestellungen, um die Szenarien zu durchlaufen. Die Ergebnisse gelten somit für Personen, die keine Vorerfahrungen in FreeCAD und mit Augmented Reality On-body Interfaces aufweisen, jedoch über Erfahrungen im Bereich CAD und in der Arbeit mit Maus und Tastatur verfügen.

## **3.4 Diskussion**

Die Diskussionsgrundlage bilden die drei zuvor beschriebenen Messverfahren sowie die daraus errechneten Ergebnisse. Nachfolgend werden alle drei Messverfahren einzeln, jedoch mit Bezug auf alle Ergebnisse diskutiert, um die Struktur der Ergebnisse aufrechtzuerhalten. Abschließend wird die Frage der Evaluation beantwortet, ob und in welchem Maße sich ein On-body Interface im Bereich CAD anbietet.

### **Zeitliche Erfassung**

Aus der zeitlichen Erfassung bspw. geht hervor, dass fünf von sieben Probanden, die zuerst mit MuT gearbeitet haben, im Nachhinein mit dem On-body Interface das zugehörige Szenario schneller abarbeiten konnten. Aufgrund der durchschnittlich schnelleren Bearbeitungszeit von 2 Minuten und 57 Sekunden kann abgeleitet werden, dass mit ausreichendem Training und einem stabileren System mit einem On-body Interface für CAD schnellere Zeiten erzielt werden können als mit MuT.

### **Lautes Denken**

Ein nicht unwesentliches Maß für die Ableitung ist die Häufigkeit und Ausrichtung des lauten Denkens in Tabelle 10, welches in 10 von 15 Fällen auf Trackingprobleme zurückzuführen ist. Demnach kann angenommen werden, dass mit einem stabileren und schnelleren System, die Durchführungszeiten nochmals verbessert und die Bewertung ebenfalls positiver ausfallen würde. Tabelle 10 zeigt außerdem, dass negativ gestimmte Äußerungen ausschließlich bei der Selektion von Funktionen aufgetreten sind, die sich auf dem Mittel- und dem Zeigefinger befunden haben.

Daher kann angenommen werden, dass die Negativität der Probanden nicht prinzipiell dem System, sondern der eingesetzten Hardware zur Erfassung der Hände der Probanden gilt. Ein stabileres und zuverlässiges Tracking würde nach Analyse der Negativaussagen ein deutlich besseres Ergebnis erzielen und die Mehrheit der Probleme des On-body Interfaces beheben.

Tabelle 9 zeigt dazu, dass eine generelle Faszination für das entwickelte On-body Interface herrschte, die sich zusätzlich über alle Funktionen des Interfaces erstreckt. 18 von 23 Aussagen beziehen sich auf die Funktionen, welche im Vergleich zu den Funktionen auf Mittel- und Zeigefinger gut erreichbar und ohne Trackingprobleme ausführbar waren. Auch wurde das Aktivieren und die allgemeine Funktionsweise des On-body Interfaces positiv bewertet, weshalb das Argument des Trackings nochmals verstärkt werden kann. Die positiven Aussagen über die Funktionen decken sich auch mit den Aussagen der Probanden über das MuT-Vorgehen und dem Probanden-Feedback.

Aus den Tabellen 11, 12, 13 und 14 geht z.B. hervor, dass Funktionen, die sofort durch einen simplen Mausklick in der CAD-Anwendung erreichbar sind, keine Probleme darstellen und keiner Notwendigkeit auf der Hand bedürfen. Hingegen versteckte Funktionen wie “Radius“ oder “Zahnrad“, die erst durch Menü-Hierarchien erreicht werden können, generelle Zustimmung auf der Hand erfahren haben. Die versteckten Funktionen wurden zudem als umständlich und anstrengend bewertet, wohingegen beim On-body Interface der Wegfall von Menüs und die Umsetzung der Optik und des Feedbacks gelobt wurden.

Daraus kann abgeleitet werden, dass sich ein On-body Interface eher für die Reduzierung von hierarchischen Menüs und versteckte Funktionen anbietet, jedoch nicht für Funktionen, die ohnehin durch einen simplen Mausklick erreichbar sind. Für das Aussehen und die Umsetzung des Interfaces gilt zudem, dass die Methode durch das positive Feedback bestärkt wird und das entwickelte System von den Probanden prinzipiell angenommen wurde, was sich auch mit den Ergebnissen des AttrakDiff-Fragebogens deckt. Tabelle 14 verdeutlicht außerdem, dass wiederum in sechs von elf Fällen nicht das Interface generell, sondern die Qualität des Trackings angemerkt wurden, was nochmals die generelle Akzeptanz des Interfaces aufzeigt.

Lediglich drei von 14 Probanden merkten an, eine einhändige Bedienung aufgrund der Einfachheit zu bevorzugen, was möglicherweise durch die Trackingprobleme bestärkt wurde. Ein Proband empfand aufgrund der Menge der eingesetzten Peripherie einen “sensory overload“, der gleichermaßen durch ein stabileres und umfangreicheres On-body Interface reduziert werden könnte.

Ebenfalls äußerte ein Proband, dass ein Interface auf dem Handrücken ohne Drehung besser wäre, was genau wie die einhändige Bedienung in zukünftigen Iterationen als Feature denkbar wäre und nicht prinzipiell eine Abneigung zum System darstellt. Die Aussagen und das Feedback der Probanden zum On-body Interface und MuT-Vorgehen zeigen demnach, dass das entwickelte On-body Interface prinzipiell keine Aversionen, sondern lediglich Verbesserungsvorschläge hervorgerufen hat. Durch eine stabilere und präzisere Erfassung der Hände kann das System weiter verbessert und die Akzeptanz für das System erhöht werden.

### SAM-Fragebögen

Der SAM-Fragebogen wurde dazu eingesetzt, die Gefühlslage von Probanden vor und nach der Benutzung des On-body Interfaces zu eruieren. Die dabei errechneten Mittelwerte aus dem Ergebnis-Abschnitt, sind kongruent mit den Ergebnissen vom lauten Denken und den AttrakDiff-Fragebögen.

Der Anstieg des Mittelwertes von 0.10 in der Dimension “Freude“ zeigt eine geringfügige Beeinflussung durch das On-body Interface, was größtenteils durch die generelle Faszination deutlich in Tabelle 9 für das On-body Interface bedingt sein könnte und als positiv erachtet wird.

Die Minderung von 1.17 in der Dimension “Erregung“ kann wiederum einen gewissen Grad an Frustration aufgrund des instabilen Trackings darstellen, das die negativen Aspekte in Tabelle 10 und 14 dominiert hat. Jedoch kann die Minderung auch in Zusammenhang mit der positiven Resonanz aus Tabelle 9 stehen, da die euphorischen Kommentare der Probanden kein unwesentlicher Indikator für ein erregtes Gemüt sind.

Der um 1.25 erhöhte Wert in der Dimension “Dominanz“ nach der Benutzung des On-body Interface verdeutlicht hingegen, dass sich die Probanden nach dem Szenario mit dem entwickelten System sicherer gefühlt und mehr Kontrolle verspürt haben, was sich auch mit den Ergebnissen aus dem AttrakDiff-Fragebogen deckt. Das Endergebnis der SAM-Auswertung bestätigt die Auswertungen und Interpretationen vom lauten Denken bezüglich der Probleme und Vorzüge des Systems.

## AttrakDiff-Fragebögen

Die Ergebnisse des AttrakDiff-Fragebogens decken sich mit den Aussagen aus Tabelle 9 und 10 sowie dem Feedback der Probanden in Tabelle 13 und 14 zum entwickelten On-body Interface und dem MuT-Vorgehen. Auch mit den Ergebnissen der SAM-Fragebögen, besonders in der Dimension “Dominanz“ stimmen die Ergebnisse überein.

Das Portfolio-Diagramm zeigt eine Einordnung des On-body Interfaces in den Bereichen selbstorientiert und begeht bei einer Konfidenz von 0.45. Der Wert der Konfidenz kann auf die Trackingprobleme und die Auswahl der Funktionen auf der Hand zurückgeführt werden.

Lediglich zwei von vier Funktionen wurden nach Tabelle 13 als nützlich auf der Hand eingestuft, da somit komplizierte Menüs wegfallen. Das Tracking galt nach Tabelle 10 und 14 als Hauptproblem für die Schwierigkeiten in der Bedienung und kann somit auch als Primärattribut für die geringe Konfidenz in der PQ des On-body Interfaces herangezogen werden. Ein besseres Tracking und eine nützlichere Auswahl der Funktionen auf der Hand, würde demnach die Konfidenz der Probanden im Bereich PQ zu Gunsten des On-body Interfaces erhöhen.

Auch kann das Tracking als ausschlaggebendes Argument für die HQ des On-body Interfaces geltend gemacht werden, da wie in Tabelle 10 einzusehen, keinerlei sonstige negative Aussagen zur hedonischen Umsetzung des On-body Interfaces gemacht wurden. Auch könnten die von den Probanden geäußerten Features wie Einhand- und Handrückenbedienung die HQ und PQ zusätzlich positiv beeinflussen.

Im Vergleich zum MuT-Vorgehen ist das Ergebnis jedoch deutlich und unterstreicht nochmals die generelle Akzeptanz der Probanden und den Mehrwert des entwickelten Systems. Das MuT-Vorgehen wurde allgemein schlechter als das On-body Interface bewertet, was durch die prinzipielle Faszination zum On-body Interface, wie auch in Tabelle 9 deutlich, begründet werden kann.

Es wird angenommen, dass vor allem aufgrund der höheren Stimulation und Identität des On-body Interfaces im Vergleich zu MuT, die Bewertung der herkömmlichen Vorgehensweise obendrein negativ beeinflusst wurde. Das Diagramm der Mittelwerte verdeutlicht außerdem, dass das entwickelte On-body Interface eine durchweg positive Resonanz der Probanden erfahren hat und auch als attraktiver gegenüber dem MuT-Vorgehen erachtet wurde.

Eine Steigerung der Attraktivität, Identität und Stimulation kann wiederum auf die Verbesserung des Trackings und eine nützlichere Implementation von Funktionen zurückgeführt werden. Der Wert von 1.70 für die Stimulation beim On-body Interface zeigt nochmals die Akzeptanz der Probanden entgegen dem On-body Interface, welche ausgehend vom Neutralwert und im Vergleich zum MuT-Vorgehen in einem hohen Plus resultiert.

Im Profil der Wortpaare werden die mangelhafte Trackingqualität und die wünschenswerten Features aus Tabelle 10 und 14 nochmals konkretisiert. Die eher durchschnittlichen Werte für das Wortpaar umständlich-direkt und widerspenstig-handhabbar im Bereich PQ können demnach zweifellos dem Tracking, der fehlenden Features und der Nützlichkeit der simplen Funktionen auf der Hand zugeschrieben werden. Ein voraussagbareres und zuverlässigeres Tracking hätte demnach Einfluss auf alle Werte im Bereich PQ. Besonders würde dabei das Empfinden für die Handhabung, die einfache Bedienung, den direkten Input und die Praktikabilität des On-body Interfaces steigen. Die Schlichtheit des Interfaces spiegelt den positiven Wert für die Übersichtlichkeit wider und deckt sich mit den Ergebnissen aus dem positiven Feedback in Tabelle 13 bezüglich Optik und Feedback-Implementation.

Die Ergebnisse im Bereich HQ-I können ebenfalls dem mangelhaften Tracking zugeordnet werden, da die Werte für Stil und Vorzeigbarkeit für die Idee des On-body Interfaces sprechen. Ein besseres Tracking hätte demnach die Beurteilung des Wortpaars laienhaft-fachmännisch positiv beeinflusst.

Im Bereich HQ-S wurden die besten Ergebnisse aller Bereiche für das On-body Interface erzielt. Daraus kann abgeleitet werden, dass wie auch in Tabelle 9 mehrfach geäußert, das Konzept und die Idee eines On-body Interfaces für die Arbeit in CAD prinzipiell positiv aufgenommen wurde. Die Kernpunkte dafür sind nach Tabelle 13, die vielschichtigen Möglichkeiten der Funktionsweise, die intuitive Bedienung und die Reduzierung von Komplexität durch das Ausbleiben von Menüs. Die Werte für Innovation, Neuartigkeit und Kreativität können von der faszinierenden Umsetzung des On-body Interfaces, deutlich in Tabelle 9, abgeleitet werden. Eine nach dem Profil der Wortpaare extrem negative Bewertung des MuT-Vorgehens im Bereich HQ-S kann ebenfalls auf die fesselnde Umsetzung des On-body Interfaces zurückgeführt werden.

Der Bereich ATT zeigt wiederum die generelle Akzeptanz des On-body Interfaces und verdeutlicht nochmals die Probleme des Trackings und der fehlenden Features wie Einhandbedienung. Die dennoch durchweg positiven Werte sprechen für die aufwendige Implementierung des On-body Interfaces. Besonders auffällig ist das Wortpaar entmutigend-motivierend, bei dem ein Wert über +2 für das On-body Interface erreicht wurde, was erneut für die Faszination der Probanden gegenüber dem On-body Interface und der generellen Idee dahinter steht.

Das On-body Interface weist eine in 24 von 28 Beurteilungen positivere Bewertung gegenüber dem MuT-Vorgehen und allgemein ein durchgehend über dem neutralen Wert liegendes Endergebnis auf. Daraus lässt sich ableiten, dass ein On-body Interface für den Einsatz in CAD, als innovative, motivierende und willkommene Idee angenommen wurde.

## **4 Schluss**

### **4.1 Fazit**

In dieser Arbeit wurde ein körperbasiertes Cross Reality User Interface entwickelt und überprüft, ob und in welchem Maße solch ein System für den CAD-Einsatz zur Lösung von Komplexitätsproblemen gegenüber konventioneller Vorgehen mit Maus und Tastatur geeignet ist. Dafür wurden Aspekte wie Augmented Reality, Ergonomie, Feedback, Usability und User Experience bei der Konzeption und Entwicklung des Systems berücksichtigt und fokussiert, sowie diverse verwandte Arbeiten und Erkenntnisse miteinbezogen. Die entwickelte Lösung wurde durch eine Evaluation untersucht und diskutiert. Die Ergebnisse der Evaluation und explizit des AB-Tests zeigen ein deutliches Interesse für ein On-body Interface zur Bewältigung von CAD-Aufgaben. Die Probanden haben das entwickelte On-body Interface über dem neutralen Durchschnitt bewertet und Punkte wie Innovation, Neuartigkeit, Motivation und Kreativität besonders hervorgehoben. Im Besonderen wurde auch die Reduzierung von Komplexität durch den Wegfall von hierarchischen Menüs und die Einfachheit, Schnelligkeit und Ästhetik des entwickelten On-body Interfaces gelobt und lediglich Faktoren wie das Tracking oder fehlende Komfortfunktionen kritisiert, jedoch keine generelle Aversion gegenüber der Idee dieser Arbeit geäußert oder festgestellt. Konkret wird von einem definitiven Mehrwert von dem entwickelten System für die Arbeit in CAD ausgegangen, welcher durch ein robusteres und präziseres Tracking, sowie durch Features wie Einhandbedienung weiter ausgebaut werden könnte.

## 4.2 Ausblick

Durch Feedback und lautes Denken der Probanden konnte ein wesentlicher Mehrwert für die zukünftige Weiterentwicklung des Systems gesammelt werden. Features, welche die Probanden der Evaluation geäußert haben, waren u.a. eine einhändige Bedienung, um Funktionen einfacher und schneller ausführen zu können, die Umsetzung eines Linkshänder-Modus, um das On-body User Interface noch ergonomischer und vielseitiger einsetzen zu können, sowie ein besseres Tracking, worunter Stabilität und Präzision verstanden werden kann. Auch ein Modus für hellere und dunklere Hauttöne wäre ein willkommener Zusatz. Zukünftige Iterationen des entwickelten Systems und generell On-body Interfaces müssten demnach einen größeren Fokus auf die konkrete Technik bzw. die Auswahl und die Implementation der Hardware legen, als auch mehr Komfortfunktionen und Variationen anbieten, um individueller auf die Benutzer eines XR-Systems im CAD-Umfeld eingehen zu können. Ebenfalls sollten keine bereits zugänglichen Funktionen neu definiert werden, sondern lediglich der Fokus auf Erweiterung und Reduktion liegen. Diese Arbeit wird als Schritt in die Richtung gesehen, unter Voraussetzung einer stabilen Nutzererfassung, durch zukünftige Iterationen, Maus oder Tastatur als primäre Eingabegeräte im Bereich CAD nicht nur zu erweitern, sondern auch zu einer Alternative zu entwickeln und sogar in Zukunft ablösen zu können. Diese und verwandte Arbeiten könnten zudem dafür sorgen, generell mehr Aufmerksamkeit für XR-Lösungen in Bezug auf CAD einzuholen und neue Ansätze in der Produktentwicklung zu etablieren.

# Stichwortverzeichnis

## Symbols

- 3D Direct Modeling, 39
- 3D-Mäuse, 39

## A

- Aktive Sensoren, 26
- AttrakDiff-Fragebogen, 90
- Auditives Feedback, 28

## C

- CAVE, 11
- Command Line Interface, 24
- Computer-aided Engineering, 31
- Computer-aided Styling, 31
- Contextual Inquiry, 19
- Cybersickness, 23

## D

- Directional Compliance, 23

## F

- Feedback Compliance, 23

## G

- Gorilla Arm Syndrome, 18

## H

- Haptisches Feedback, 27
- Head-mounted Display, 11
- Hybrid CAD-Systems, 39

## I

- Imaginary user interface, 45
- ISO Norm 9241-11, 19
- ISO Norm 9241-210, 21

## J

- Joy of Use, 21

## K

- Körperfixierte Darstellung, 52
- Kinästhetisches Feedback, 27

## L

- Lautes Denken, 91

## M

- Mentale Modelle, 22
- Motion Sickness, 23
- Multi-touch Input, 59

## N

- Natural Interfaces, 35

## O

- On-skin Interfaces, 26

## P

- Passive Sensoren, 26
- Personas, 20

## R

- Rapid Prototyping, 40

## S

- SAM-Fragebogen, 91
- Sensor HCI, 8

## T

- Taktiles Feedback, 27
- Temporal Compliance, 23
- Time to Market, 29

## V

- Visual HCI, 8
- Visuelles Feedback, 27

## Literaturverzeichnis

- Al-wabil, A., Zaphiris, P., und Wilson, S. (2007). Development of a multiple heuristics evaluation table (MHET) to support software development and usability analysis. *Universal Access in HCI*, 4554(2005):593–602.
- Alger, M. (2015). Visual design methods for virtual reality. *Ravensbourne*. [http://aperturesciencellc.com/vr/VisualDesignMethodsforVR\\_MikeAlger.pdf](http://aperturesciencellc.com/vr/VisualDesignMethodsforVR_MikeAlger.pdf).
- Andrade, T. und Bastos, D. (2019). Extended reality in iot scenarios: Concepts, applications and future trends. *Proceedings of the 2019 5th Experiment at International Conference, exp.at 2019*, Seiten 107–112.
- Antonio, Y. und Vilas, G. (2013). Overview of Virtual Reality Technologies. *Interactive Multimedia Conference*, 2013.
- Azuma, R. T. (1997). A survey of augmented reality. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 6(4):355–385.
- Bailenson, J. (2018). *Experience on demand: What virtual reality is, how it works, and what it can do*. WW Norton & Company.
- Bau, O. und Poupyrev, I. (2012). REVEL: Tactile feedback technology for augmented reality. *ACM Transactions on Graphics*, 31(4):1–11.
- Billinghurst, M., Clark, A., und Lee, G. (2014). A survey of augmented reality. *Foundations and Trends in Human-Computer Interaction*, 8(2-3):73–272.
- Black, A. (1990). Visible planning on paper and on screen: The impact of working medium on decision-making by novice graphic designers. *Behaviour & Information Technology*, 9(4):283–296.
- Boritz, J. und Booth, K. S. (1997). A study of interactive 3D point location in a computer simulated virtual environment. In *A study of interactive 3D point location in a computer simulated virtual environment*, Seiten 181–187. Proceedings of the ACM symposium on Virtual reality software and technology.
- Bowman, D. A. und Laviola, J. J. (1999). An Introduction to 3-D User interface design. *Massachusetts Institute of Technology*, 10(1):96–108.
- Bowman, D. A. und Wingrave, C. A. (2001). Design and evaluation of menu systems for immersive virtual environments. In *Proceedings IEEE Virtual Reality 2001*, Seiten 149–156. IEEE.

- Bradley, M. M. und Lang, P. J. (1994). Measuring emotion: The self-assessment manikin and the semantic differential. *Journal of Behavior Therapy and Experimental Psychiatry*, 25(1):49–59.
- Brandenburg, E. (2019). *Gestaltungsrichtlinien für die Visualisierung von Produktinformationen in der virtuellen Umgebung CAVE zur Unterstützung von Design Review Teams*. Fraunhofer Verlag.
- Brown, P. (2009). CAD: Do computers aid the design process after all? *Intersect: The Stanford Journal of Science, Technology, and Society*, 2(1):52–66.
- Burdea, G. C. (1996). Force and touch feedback for virtual reality. *John Wiley & Sons, Inc.*
- Çamcı, A., Lee, K., Roberts, C. J., und Forbes, A. G. (2017). Inviso: A cross-platform user interface for creating virtual sonic environments. In *Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, Seiten 507–518.
- Cater, J. P. (1994). Smell/taste: odors in reality. In *Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, Band 2, Seiten 1781–vol. IEEE.
- Chavan, S. R. (2016). Augmented Reality vs . Virtual Reality : Differences and Similarities. *Int. J. Adv. Res. Comput. Eng. Technol*, 5(6):1947–1952.
- Chirico, A., Lucidi, F., De Laurentiis, M., Milanese, C., Napoli, A., und Giordano, A. (2016). Virtual reality in health system: beyond entertainment. a mini-review on the efficacy of VR during cancer treatment. *Journal of cellular physiology*, 231(2):275–287.
- Coquillart, S., Brunnett, G., und Welch, G. (2011). *Virtual Realities - the value of Constraints for 3d user interfaces*. Springer Verlag, Virtual Realities. Springer, Vienna.
- Cruz-Neira, C., Sandin, D. J., DeFanti, T. A., Kenyon, R. V., und Hart, J. C. (1992). The CAVE: audio visual experience automatic virtual environment. *Communications of the ACM*, 35(6):64–73.
- Deutsches Institut für Normung e.V. (1999). DIN EN ISO 9241-11 Ergonomische Anforderungen für Bürotätigkeiten mit Bildschirmgeräten — Teil 11: Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit - Leitsätze.

Deutsches Institut für Normung e.V. (2011). DIN EN ISO 9241-210 Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 210: Prozess zur Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme.

Dezfuli, N. und Müller, F. B. (2012). PalmRC : Imaginary Palm-based Remote Control for Eyes-free Television Interaction. *Proceedings of the 10th European conference on Interactive tv and video*, Seiten 27–34.

Dorta, T., Kinayoglu, G., und Hoffmann, M. (2015). Hyve-3D and rethinking the "3D cursorünfolding a natural interaction model for remote and local co-design in VR. In *Hyve-3D and rethinking the "3D cursorünfolding a natural interaction model for remote and local co-design in VR*, Seiten 1–1. SIGGRAPH 2015.

Dünser, A., Grasset, R., Seichter, H., und Billinghurst, M. (2007). Applying HCI principles to AR systems design. *Engineering: Conference Contributions*, 2155.

Eigner, M. (2014). Einleitung–Modellbasierte Virtuelle Produktentwicklung. In *Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung*, Seiten 1–13. Springer.

Eigner, M. und Schleidt, T. (2006). Unternehmensübergreifende Zusammenarbeit im Cross Enterprise Engineering. *wt Werkstattstechnik online*, 8.

Eigner, M. und Stelzer, R. (2009). *Product Lifecycle Management - Ein Leitfaden*. Springer-Verlag Berlin.

Endsley, T. C., Sprehn, K. A., Brill, R. M., Ryan, K. J., Vincent, E. C., und Martin, J. M. (2017). Augmented reality design heuristics: Designing for dynamic interactions. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, Band 61, Seiten 2100–2104. SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA.

Fast-Berglund, Å., Gong, L., und Li, D. (2018). Testing and validating Extended Reality (xR) technologies in manufacturing. *Procedia Manufacturing*, 25:31–38.

Fiorentino, M., Monno, G., und Uva, A. (2006). CAD interfaces in virtual reality: issues and solutions. In *CAD interfaces in virtual reality: issues and solutions*.

Fitts, P. M. (1954). The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of experimental psychology*, 47(6):381.

Fjeld, M. und Voegli, B. M. (2002). Augmented chemistry: An interactive educational workbench. In *Proceedings. International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, Seiten 259–321. IEEE.

- Frommann, U. (2005). Die Methode "Lautes Denken".
- Fuchs, H., Livingston, M. A., Raskar, R., Keller, K., Crawford, J. R., Rademacher, P., Drake, S. H., Meyer, A. A., u a. (1998). Augmented reality visualization for laparoscopic surgery. In *International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention*, Seiten 934–943. Springer.
- Funk, M., Bächler, A., Bächler, L., Kosch, T., Heidenreich, T., und Schmidt, A. (2017). Working with Augmented Reality? A Long-Term Analysis of In-Situ Instructions at the Assembly Workplace. In *Proceedings of the 10th International Conference on PErvasive Technologies Related to Assistive Environments*, PETRA '17, Seite 222–229, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery.
- Galitz, W. O. (2007). *The Essential Guide to User Interface Design: An Introduction to GUI Design Principles and Techniques*. John Wiley & Sons.
- Gannon, M., Grossman, T., und Fitzmaurice, G. (2016). ExoSkin: On-Body Fabrication. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '16, Seite 5996–6007, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery.
- García Reyes, L. E. (2013). Computer-aided design systems for the 21st century: some design guidelines. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9):1689–1699.
- Gustafson, S., Bierwirth, D., und Baudisch, P. (2010). Imaginary interfaces: spatial interaction with empty hands and without visual feedback. In *Proceedings of the 23nd annual ACM symposium on User interface software and technology*, Seiten 3–12. Proceedings of the 23nd annual ACM symposium on User interface software and technology.
- Gustafson, S., Holz, C., und Baudisch, P. (2011). Imaginary phone: Learning imaginary interfaces by transferring spatial memory from a familiar device. *UIST'11 - Proceedings of the 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, Seiten 283–292.
- Hansberger, J. T., Peng, C., Mathis, S. L., Areyur Shanthakumar, V., Meacham, S. C., Cao, L., und Blakely, V. R. (2017). Dispelling the gorilla arm syndrome: The viability of prolonged gesture interactions. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 10280:505–520.

- Harrison, C. (2018). The HCI innovator's dilemma. *Interactions*, 25(6):26–33.
- Harrison, C. und Faste, H. (2014). Implications of location and touch for on-body projected interfaces. In *Proceedings of the 2014 conference on Designing interactive systems*, Seiten 543–552.
- Harrison, C., Ramamurthy, S., und Hudson, S. E. (2012). On-body interaction: armed and dangerous. In *Proceedings of the Sixth International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction (TEI '12)*, Stephen N. Spencer (Ed.). ACM, New York, NY, USA, Seiten 69–76.
- Harrison, C., Tan, D., und Morris, D. (2011). Skinput: appropriating the skin as an interactive canvas. *Communications of the ACM*, 54(8):111–118.
- Harrison, C. und Wilson, A. D. (2011). OmniTouch : Wearable Multitouch Interaction Everywhere. *Proceedings of the 24th annual ACM symposium on User interface software and technology*, Seiten 441–450.
- Hassenzahl, M., Burmester, M., und Koller, F. (2003). AttrakDiff: Ein Fragebogen zur Messung wahrgenommener hedonischer und pragmatischer Qualität. *Mensch & Computer Interaktion in Bewegung*, Seiten 187–196.
- Hertenstein, M. J. (2002). Touch: Its communicative functions in infancy. *Human Development*, 45(2):70–94.
- Hertenstein, M. J., Holmes, R., McCullough, M., und Keltner, D. (2009). The communication of emotion via touch. *Emotion*, 9(4):566.
- Hertenstein, M. J., Keltner, D., App, B., Bulleit, B. A., und Jaskolka, A. R. (2006). Touch communicates distinct emotions. *Emotion*, 6(3):528.
- Hincapié-Ramos, J. D., Guo, X., Moghadasian, P., und Irani, P. (2014). Consumed endurance: a metric to quantify arm fatigue of mid-air interactions. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, Seiten 1063–1072.
- Ingenieure, V. D. (1993). *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren Technischer Systeme und Produkte*. VDI-Verlag.
- Kalawsky, R. (1997). The human dimension in future virtual design/prototyping systems. In *ImechE Conference Transactions*, Band 3, Seiten 179–184. Mechanical Engineering Publications.

- Kirsner, S. (2016). Adding a level of reality to online shopping. *The Boston Globe*, 23.
- Kohli, L. und Whitton, M. (2005). The haptic hand: Providing user interface feedback with the non-dominant hand in virtual environments. *Proceedings - Graphics Interface*, Seiten 1–8.
- Kosmadoudi, Z., Lim, T., Ritchie, J., Louchart, S., Liu, Y., und Sung, R. (2013). Engineering design using game-enhanced CAD: The potential to augment the user experience with game elements. *CAD Computer Aided Design*, 45(3):777–795.
- Kou, X., Xue, S., und Tan, S. (2010). Knowledge-guided inference for voice-enabled CAD. *Computer-Aided Design*, 42(6):545–557.
- LaViola, J. J., Kruijff, E., McMahan, R. P., Bowman, D. A., und Poupyrev, I. (2004). *3D User interfaces: theory and practice*. Addison-Wesley, 2. Auflage.
- LaViola Jr, J. J. (2000). A discussion of cybersickness in virtual environments. *ACM Sigchi Bulletin*, 32(1):47–56.
- LaViola Jr, J. J. (2014). *An Introduction to 3D Gestural Interfaces*. ACM SIGGRAPH 2014 Courses.
- LaViola Jr, J. J. und Marks, R. L. (2010). An introduction to 3D spatial interaction with video game motion controllers. In *ACM SIGGRAPH 2010 Courses*, Seiten 1–78. ACM SIGGRAPH 2010 Courses.
- Liontas, J. I. (2014). Teaching and Learning English in AR-Infused Worlds Defining AR , VR , MR , and XR. *TESOL Connections*, January 2021:1–8.
- Luczak, H., Beitz, W., Springer, J., und Langner, T. (1991). Frictions and Frustrations in Creative-Informatory Work with Computer Aided Design–CAD-Systems–Congress I: Work with Terminals: Health aspects: Workload, stress and strain and irregular working hours; Causes and Measures of Stress. *Proceedings of the Fourth International Conference on Human-Computer Interaction*, 1:175–179.
- Manresa, C., Varona, J., Mas, R., und Perales, F. J. (2005). Hand tracking and gesture recognition for human-computer interaction. *ELCVIA Electronic Letters on Computer Vision and Image Analysis*, 5(3):96–104.
- Marcus, A., Abromowitz, S., und Abulkhair, M. (2013). *Design, user experience, and usability*. Springer.

- Mathew, A. R., Hajj, A. A., und Abri, A. A. (2011). Human-Computer Interaction ( HCI ): An Overview. *IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering*, 1:41–42.
- Milgram, P. und Kishino, F. (1994). A taxonomy of mixed reality visual displays. *IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems*, 77(12):1321–1329.
- Milgram, P., Takemura, H., Utsumi, a., und Kishino, F. (1994). Mixed Reality ( MR ) Reality-Virtuality ( RV ) Continuum. *Systems Research*, 2351(Telemanipulator and Telepresence Technologies):282–292.
- Millette, A. und McGuffin, M. J. (2017). DualCAD: Integrating Augmented Reality with a Desktop GUI and Smartphone Interaction. *Adjunct Proceedings of the 2016 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality, ISMAR-Adjunct 2016*, Seiten 21–26.
- Mistry, P. und Maes, P. (2009). SixthSense: A Wearable Gestural Interface. In *ACM SIGGRAPH ASIA 2009 Art Gallery and Emerging Technologies: Adaptation*, SIGGRAPH ASIA '09, Seite 85, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery.
- Montagu, A. (1972). Touching, the human significance of the skin. *Perennial Library*, Seiten 98–99.
- Newnham, C., van den Berg, N., und Beanland, M. (2018). Making in mixed reality. In *Proceedings of ACADIA*, Seiten 88–97.
- Nielsen, J. (1994). *Usability engineering*. Morgan Kaufmann.
- Nielsen, J. und Molich, R. (1990). Heuristic evaluation of user interfaces. *CHI '90 Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*.
- Niijima, A. und Ogawa, T. (2016). Study on control method of virtual food texture by electrical muscle stimulation. In *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, Seiten 199–200.
- Norman, D. (2008). Design of Everyday Things - Donald Norman Psychopathology of Everyday Things Why is usability important ? *Basic Books*, Seiten 1–19.
- Norman, D. A. (1988). *The psychology of everyday things*. Basic books.
- Paavilainen, J., Korhonen, H., Alha, K., Stenros, J., Koskinen, E., und Mäyrä, F. (2017). The Pokémon go experience: A location-based augmented reality mobile game goes mainstream. *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*, 2017-May(Figure 1):2493–2498.

- Pavlovych, A. und Stuerzlinger, W. (2009). The tradeoff between spatial jitter and latency in pointing tasks. In *The tradeoff between spatial jitter and latency in pointing tasks*, Seiten 187–196.
- Psotka, J. (1995). Immersive training systems: Virtual reality and education and training. *Instructional science*, 23(5-6):405–431.
- Ranasinghe, N. und Do, E. Y.-L. (2016). Virtual sweet: Simulating sweet sensation using thermal stimulation on the tip of the tongue. In *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, Seiten 127–128.
- Rat der EU (2007). Richtlinie 89 / 654 / EWG des Rates über Mindestvorschriften für Sicherheit und Gesundheitsschutz in Arbeitsstätten ( Erste Einzelrichtlinie im Sinne des Artikels 16 Absatz 1 der Richtlinie 89 / 391 / EWG ). *Rat der europäischen Union*, 1989(L):1–16.
- Reilly, D., Salimian, M., MacKay, B., Mathiasen, N., Edwards, W. K., und Franz, J. (2014). SecSpace: prototyping usable privacy and security for mixed reality collaborative environments. In *Proceedings of the 2014 ACM SIGCHI symposium on Engineering interactive computing systems*, Seiten 273–282.
- Ren, J., Liu, Y., und Ruan, Z. (2016). Architecture in an age of augmented reality: applications and practices for mobile intelligence BIM-based AR in the entire lifecycle. *DEStech Transactions on Computer Science and Engineering*, ICEITI(2016).
- Richter, M. und Flückiger, M. D. (2016). *Usability und UX kompakt*. Springer Vieweg, 4. Auflage.
- Riecke, B. E., LaViola Jr., J. J., und Kruijff, E. (2018). 3D User Interfaces for Virtual Reality and Games : 3D Selection , Manipulation , and Spatial Navigation. *ACM SIGGRAPH 2018 Courses*, 13(August).
- Ritsos, P., Ritsos, D., und Gougoulis, A. (2011). Standards for Augmented Reality: a User Experience perspective. *Standards Meeting-February 17*, Seiten 1–9.
- Robertson, B. und Radcliffe, D. (2009). Impact of CAD tools on creative problem solving in engineering design. *Computer-aided design*, 41(3):136–146.
- Ross, D. T. (1956). Gestalt programming: A new concept in automatic programming. In *Papers presented at the February 7-9, 1956, joint ACM-AIEE-IRE western computer conference*, Seiten 5–10.

- Sasaki, H., Kuroda, T., Manabe, Y., und Chihara, K. (2002). Hand-Menu System : A Deviceless Virtual Input Interface for Wearable Computer. *Transactions of the Virtual Reality Society of Japan*, 7(3):393–401.
- Schaer, P. und Thum, M. (2007). State-of-the-art: Interaktion in Erweiterten Realitäten. Arbeitsberichte aus dem Fachbereich Informatik. *Universität Koblenz - Institut für Computervisualistik*, Fachbereich 4(2007,10):106.
- Shackel, B. (2009). Usability–Context, framework, definition, design and evaluation. *Interacting with computers*, 21(5-6):339–346.
- Sinha, G., Shahi, R., und Shankar, M. (2010). Human Computer Interaction. *Proceedings - 3rd International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology, ICETET 2010*, Seiten 1–4.
- Smith, T. J. und Smith, K. U. (1987). Feedback-control mechanisms of human behavior. *Handbook of human factors*, Seiten 251–293.
- Speicher, M., Hall, B. D., und Nebeling, M. (2019). What is mixed reality? *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*, Seiten 1–15.
- StutCAD (2020). *Siemens NX-Fortgeschritten Kursunterlagen*. Universität Stuttgart.
- Sutherland, I. (1965). The ultimate display. *Proceedings of the IFIPS Congress 65*, 2:506–508.
- Sutherland, I. E. (1964). Sketchpad a man-machine graphical communication system. *Simulation*, 2(5):R–3.
- Taylor, A. G. (2016). *Develop Microsoft HoloLens Apps Now*. Apress, USA, 1. Auflage.
- Teather, R. J., Pavlovych, A., Stuerzlinger, W., und MacKenzie, I. S. (2009). Effects of tracking technology, latency, and spatial jitter on object movement. In *Effects of tracking technology, latency, and spatial jitter on object movement*, Seiten 43–50. IEEE.
- Tenmoku, R., Kanbara, M., und Yokoya, N. (2005). Annotating user-viewed objects for wearable AR systems. In *Annotating user-viewed objects for wearable AR systems*, Seiten 192–193. IEEE, Fourth IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR’05).

- The Pokémon Company (2016). Pokémon GO Application. *Pokémon Go Homepage* <https://pokemongolive.com/de/>.
- Tornincasa, S., Di Monaco, F., u a. (2010). The future and the evolution of CAD. In *Proceedings of the 14th international research/expert conference: trends in the development of machinery and associated technology*, Band 1, Seiten 11–18.
- Turk, M. und Fragoso, V. (2015). Computer vision for mobile augmented reality. In *Mobile cloud visual media computing*, Seiten 3–42. Springer.
- Vajna, S., Weber, C., Zeman, K., Hehenberger, P., Gerhard, D., und Wartzack, S. (2018). *CAx für Ingenieure*. Springer-Verlag.
- Van Krevelen, D. und Poelman, R. (2010). A Survey of Augmented Reality Technologies, Applications and Limitations. *International Journal of Virtual Reality*, 9(2):1–20.
- Vietor, T., Weber, C., und Zeman, K. (2018). VDI 2221 - Entwicklung technischer Produkte und Systeme - Gestaltung individueller Produktentwicklungsprozesse. *Verein Deutscher Ingenieure*, Seite 29.
- Waern, K.-G. (1988). Cognitive aspects of computer aided design. In *Handbook of human-computer interaction*, Seiten 701–708. Elsevier.
- Wang, R. Y., Paris, S., und Popovic, J. (2011). 6D hands: Markerless hand tracking for computer aided design. *UIST'11 - Proceedings of the 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, Seiten 549–557.
- Weidlich, D., Cser, L., Polzin, T., Cristiano, D., und Zickner, H. (2007). Virtual reality approaches for immersive design.
- Weigel, M., Mehta, V., und Steinle, J. (2014). More than Touch: Understanding How People Use Skin as an Input Surface for Mobile Computing. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '14*, Seite 179–188, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery.
- Wetzel, R., McCall, R., Braun, A. K., und Broll, W. (2008). Guidelines for designing augmented reality games. *ACM Future Play 2008 International Academic Conference on the Future of Game Design and Technology, Future Play: Research, Play, Share*, Seiten 173–180.
- Wilson, A. D. und Benko, H. (2010). Combining multiple depth cameras and projectors for interactions on, above and between surfaces. In *Proceedings of the*

*23nd annual ACM symposium on User interface software and technology*, Seiten 273–282.

Wolfartsberger, J. (2019). Analyzing the potential of Virtual Reality for engineering design review. *Automation in Construction*, 104(November 2018):27–37.

Xiao, R., Cao, T., Guo, N., Zhuo, J., Zhang, Y., und Harrison, C. (2018). LumiWatch: On-Arm Projected Graphics and Touch Input. *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '18*, Seiten 1–11.

Xiaoling, W., Peng, Z., Zhifang, W., Yan, S., Bin, L., und Yangchun, L. (2004). Development an interactive VR training for CNC machining. In *Proceedings of the 2004 ACM SIGGRAPH international conference on Virtual Reality continuum and its applications in industry*, Seiten 131–133.

Xu, C. (2021). Nreal: Ready-to-wear Mixed Reality Glasses. In Chair, C., Herausgeber, *SPIE AVR21 Industry Talks II*, Band 11764. International Society for Optics and Photonics, SPIE.

Zhang, Y., Sotudeh, R., und Fernando, T. (2005). The of visual and auditory feedback for assembly task performance in a virtual environment. *Spring Conference on Computer Graphics, SCCG 2005 - Conference Proceedings*, 1(212):59–66.

Ziker, C., Truman, B., und Dodds, H. (2021). Cross Reality ( XR ): Challenges and Opportunities Across the Spectrum. *SpringerBriefs in Statistics*, Seiten 55–77.