



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

# Masterthesis

Sascha Waltz

VR/AR Techniken für Industrie 4.0  
Anwendungen am Beispiel einer  
Windkraftanlage

Sascha Waltz

VR/AR Techniken für Industrie 4.0 Anwendungen  
am Beispiel einer Windkraftanlage

Masterthesisarbeit eingereicht im Rahmen der Masterthesisprüfung  
im Studiengang Master Informatik  
am Department Informatik  
der Fakultät Technik und Informatik  
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

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

Abgegeben am 12.10.2018

**Sascha Waltz**

**Thema der Arbeit**

VR/AR Techniken für Industrie 4.0 Anwendungen am Beispiel einer Windkraftanlage

**Stichworte**

VR, Virtual Reality, AR, Augmented Reality, Windkraftanlage, Industrie 4.0, Lernmethoden, Cyber-Physical Systems

**Kurzzusammenfassung**

Das Ziel dieser Arbeit ist die Konzeption und Entwicklung einer Simulation in Virtual Reality und einer Anwendung in Augmented Reality, die es ermöglichen, die Vorzüge der voranschreitenden Digitalisierung im Industrie 4.0 Umfeld zu nutzen. Hierzu werden die Techniken und Möglichkeiten von virtuellen Realitäten untersucht. Die Erkenntnisse werden genutzt um mit Hilfe zweier Prototypen zu überprüfen, ob es möglich ist, eine Verbindung zwischen virtuellen Anwendungen und Cyber-Physical Systems herzustellen. Dabei steht der Nutzen für den Anwender im Fokus.

**Sascha Waltz**

**Title of the Paper**

VR/AR Techniques for Industry 4.0 Applications using a wind turbine as an example

**Keywords**

VR, Virtual Reality, AR, Augmented Reality, Wind Turbine, Industry 4.0, learning methods, Cyber-Physical Systems

**Abstract**

The goal of this work is the conception and development of a simulation in virtual reality and an application in augmented reality, which make it possible to take advantage of the advancing digitization in the Industry 4.0 environment. For this the techniques and possibilities of virtual realities are examined. The findings are used to check with the help of two prototypes, whether it is possible to establish a connection between virtual applications and cyber-physical systems. The focus is on the benefits for the user.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation . . . . .	1
1.2	Zielsetzung . . . . .	2
1.3	Gliederung . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Analyse</b>	<b>4</b>
2.1	Einleitung . . . . .	4
2.2	Cyber Physical Systems (CPS) . . . . .	4
2.3	Ubiquitous Computing . . . . .	11
2.3.1	Internet of Things (IoT) . . . . .	13
2.4	Industrie 4.0 . . . . .	13
2.4.1	Definition . . . . .	13
2.4.2	Vorteile von Industrie 4.0 . . . . .	14
2.4.3	Entwicklung . . . . .	15
2.5	Virtuelle Realitäten . . . . .	16
2.5.1	Mixed Reality (MR) . . . . .	17
2.5.2	Virtual Reality (VR) . . . . .	18
2.5.3	Augmented Reality (AR) . . . . .	25
2.6	Interaktionskonzepte . . . . .	28
2.7	Lernmöglichkeiten . . . . .	30
2.8	Fazit . . . . .	33
<b>3</b>	<b>Entwurf</b>	<b>35</b>
3.1	Einleitung . . . . .	35
3.2	Szenario 01: Wartungsarbeiten von Windkraftanlagen . . . . .	35
3.2.1	Einleitung . . . . .	35
3.2.2	Analyse . . . . .	36
3.2.3	Aufbau . . . . .	37
3.3	Szenario 02: Wartung von Systemen . . . . .	39
3.3.1	Einleitung . . . . .	39
3.3.2	Analyse . . . . .	39
3.3.3	Aufbau . . . . .	41
3.4	Fazit . . . . .	43

<b>4</b>	<b>Prototyp</b>	<b>44</b>
4.1	Einleitung . . . . .	44
4.2	Simulation 1: Vorbereitung auf einen Wartungseinsatz . . . . .	44
4.3	Simulation 2: Unterstützung bei einem Wartungseinsatz . . . . .	47
4.4	Fazit . . . . .	51
<b>5</b>	<b>Fazit</b>	<b>54</b>
5.1	Zusammenfassung . . . . .	54
5.2	Ausblick . . . . .	55

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Zwiebelschalenarchitektur von Cyber Physical Systems (vgl. <a href="#">Broy, 2010</a> )	6
2.2	Idealtypisches Schichtenmodell der Cyber-Physical Systems (vgl. <a href="#">acatech, 2011</a> )	7
2.3	Domänenübergreifende Vernetzung von Cyber-Physical Systems (vgl. <a href="#">acatech, 2011</a> )	9
2.4	Mark Weiser's Key Components for Ubiquitous Computing (vgl. <a href="#">Weiser, 1999</a> )	12
2.5	Geschichte und Hintergrund Industrie 4.0 <a href="#">Pilz (2018)</a>	15
2.6	Schematische Darstellung von Mixed Reality (vgl. <a href="#">Milgram u. a., 1995</a> )	17
2.7	Konzept Holodeck ( <a href="#">DeSF</a> )	18
2.8	Gängige VR-Technologien	19
2.9	Virtual Reality Triangle (vgl. <a href="#">Burdea und Coiffet, 2003</a> )	20
2.10	Funktionsweise des HTC Vive Roomscale mit den Basisstationen (vgl. <a href="#">HTC, 2018a</a> )	22
2.11	Unterschied zwischen 3 und 6 Freiheitsgraden (vgl. <a href="#">Qualcomm, 2017</a> )	23
2.12	Sensorama Simulator von Morton Heilig (1962) (vgl. <a href="#">Heilig, 1962</a> )	24
2.13	Video See-Through-Technik (vgl. <a href="#">Dörner u. a., 2013</a> )	26
2.14	Optische See-Through-Technik (vgl. <a href="#">Dörner u. a., 2013</a> )	27
2.15	Prototypisches VR System mit HMD, Tracking und Eingabegerät (vgl. <a href="#">Butz und Krüger, 2017</a> )	29
2.16	Verschiedene Arten der Interaktion durch ein HMD (vgl. <a href="#">Microsoft, 2018</a> )	29
2.17	Flugsimulatoren Anfang der 1930er Jahre und Heute	31
2.18	TurkDeck: Physical Virtual Reality Based on People (vgl. <a href="#">Cheng u. a., 2015</a> )	32
3.1	Verschiedene Bauarten von Windkraftanlagen (vgl. <a href="#">BWE - Bundesverband WindEnergie, 2018</a> )	36
3.2	VR-Simulation des Inneren der Gondel einer Windkraftanlage <a href="#">Bronsch (2018)</a>	38
3.3	Wartung eines Aufzugs mit Hilfe der HoloLens ((vgl. <a href="#">Ridder, 2016</a> ))	40
3.4	Ablauf Interaktion, Authentifizierung, Anzeige des Objekts <a href="#">Waltz (2017a)</a>	41
3.5	Röntgenblick in einer Flugzeugkabine	42

4.1	Virtuelle Offshore-Windenergieanlage <a href="#">CSTI (2017c)</a> . . . . .	45
4.2	Übersicht der Gondel ohne Gehäuse in Unity3D . . . . .	46
4.3	Verschiedene Arten der Lernunterstützung . . . . .	46
4.4	Einbindung von Vuforia-Engine und Objekten in Unity3D . . . . .	47
4.5	Vuforia Target Manager . . . . .	48
4.6	Target Images . . . . .	49
4.7	Features der beiden Target Images im Vergleich . . . . .	50
4.8	Interface Einblendung bei erkanntem QR-Code . . . . .	51

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Der Begriff „*Industrie 4.0*“ ist seit einigen Jahren ein weit verbreiteter Begriff im Internet geworden. Es ist ein Synonym für die Digitalisierung der Produktion in industriellen Anlagen und soll gleichzeitig die vierte industrielle Revolution kennzeichnen. Kritiker dieser Bezeichnung sprechen lieber von der „*zweiten Phase der Digitalisierung*“ ((vgl. [Hirsch-Kreinsen u. a., 2018](#))), da die Grundlage immer noch die Microchip-Architektur ist, die schon die dritte industrielle Revolution begründete. Alles in allem geht es darum, die vernetzten Systeme zu nutzen um immer weiter reichende Kommunikation zu ermöglichen. Dank dem Internet lassen sich Daten in Bruchteilen von Sekunden um die ganze Welt schicken. So können Systeme untereinander Informationen austauschen und sich aufeinander abstimmen. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Informationstranzparenz: Daten von möglichst allen Dingen der realen Welt sollen diese in der Digitalen abbilden. Immer mehr Alltagsgegenstände werden mit Sensoren und Kommunikationselektronik ausgestattet und sind in der Lage ihren eigenen Status in der digitalen Welt bekannt zu machen. Mit Hilfe dieser Informationen können Assistenzsysteme und Cyber-Physical Systems geschaffen werden, die den Menschen bei der Arbeit unterstützen oder diesen sogar ersetzen. Sie sind in der Lage auf Grund der gesammelten Daten in einem System eigene Entscheidungen zu treffen und autonom zu arbeiten. Hier wird der Mensch nur noch im Falle eines Problems gebraucht.

Zwei weitere Begriffe die seit einigen Jahren immer mehr an Aufmerksamkeit auf sich ziehen sind „*Virtual Reality (VR)*“ und „*Augmented Reality (AR)*“. Das Schaffen von virtuellen Welten fasziniert viele Menschen schon seit Jahren, doch erst der technologische Fortschritt hat es zugelassen, dass sowohl virtuelle Welten als auch

erweiterte Realitäten nutzbar geworden sind. Ein Großteil dieser Technologie wird im Gaming-Sektor angepriesen und genutzt, selten liest man von Einsätzen im professionellen Umfeld. Dabei lassen sich gerade hier realitätsnahe virtuelle Welten schaffen, die ihre Nutzer unterstützen können. Die erweiterte Realität ermöglicht es, die reale Umgebung mit virtuellen Elementen anzureichern. Dies können Informationen, Hinweise oder Hilfestellungen sein, die dem Anwender über ein entsprechendes Display eingeblendet werden, ohne die reale Welt dabei auszublenden.

### 1.2 Zielsetzung

Die Systeme im industriellen Bereich werden durch Cyber-Physical Systems immer größer und komplexer, jedes System besitzt Komponenten, die für sich genommen schon Selbstauskunftsfähig sind, Daten sammeln und veröffentlichen. Ist die Visualisierung solcher Daten direkt am Objekt durchführbar? In dieser Arbeit soll überprüft und getestet werden, ob Augmented Reality eine Möglichkeit bietet einen Menschen mit Daten zu unterstützen, die direkt am System eingeblendet werden können.

In wie weit ist es möglich mit Virtual Reality Umgebungen in einer Industrie 4.0 Umgebung Menschen zu unterstützen? Virtuelle Umgebungen bieten diverse Vorteile wenn sie einer realen Umgebung nachempfunden sind.

Eine Windkraftanlage ist eine komplexe industrielle Anlage, anhand derer die Einsatzmöglichkeiten umgesetzt und erprobt werden sollen.

### 1.3 Gliederung

Diese Arbeit besteht aus insgesamt fünf Kapiteln. Beginnend mit dieser Einleitung, welche mit dieser Gliederung endet und eine kurze Übersicht über das Thema geben soll.

Das zweite Kapitel ist die Analyse. Hier werden alle erforderlichen Bereiche beleuchtet, die in diese Arbeit mit einspielen. Angefangen mit Cyber-Physical Systems und Ubiquitous Computing, welche die Grundlage für Industrie 4.0 bilden. Anschließend

## *1 Einleitung*

---

werden virtuelle Realitäten behandelt. Der Abschluss besteht aus Interaktionskonzepten und Lernmöglichkeiten, speziell für virtuelle und erweiterte Realitäten.

Im dritten Kapitel wird der Entwurf von zwei möglichen Szenarien vorgestellt, wovon eines im VR-Umfeld und das Zweite im AR-Bereich angesiedelt sind.

Kapitel vier befasst sich im Anschluss mit der Umsetzung der Entwürfe in Prototypen und deren anschließender Bewertung.

Den Abschluss bildet das fünfte Kapitel mit dem Fazit und einem Ausblick auf zukünftige Arbeiten, die auf dieser aufbauen können.

## 2 Analyse

### 2.1 Einleitung

In diesem Kapitel sollen die Einflüsse einzelner Aspekte, deren Entwicklung und die Zusammenhänge aufgezeigt werden.

Zunächst werden Cyber-Physical Systems und Ubiquitous Computing behandelt, die in den letzten Jahren immer weiter verbreitet und ausgebaut wurden. Im Zusammenhang damit wird der Begriff „*Industrie 4.0*“ genauer betrachtet, welcher ebenfalls seit einigen Jahren immer mehr an Bedeutung gewinnt. Ein weiterer Abschnitt wird die virtuellen Realitäten und ihre Eigenarten behandeln, dabei wird nicht nur Virtual Reality (VR) behandelt, sondern auch Augmented Reality (AR) und Mixed Reality (MR). Den Abschluss der Analyse bilden Interaktionskonzepte von Mensch und Maschine mit dem Schwerpunkt auf virtuelle Interaktion und computer- und VR-gestützte Lernkonzepte.

### 2.2 Cyber Physical Systems (CPS)

Der Begriff „Cyber Physical Systems“ prägt seit einigen Jahren die Veröffentlichungen und Paper im Bereich der vernetzten und verteilten Systeme. Die National Science Foundation hat im Februar 2009 die erste *Program Announcements & Information* zu CPS veröffentlicht, die seitdem jährlich erneuert wird. Das Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS<sup>1</sup> beschreibt die Komponenten von Cyber-Physical Systems wie folgt(vgl. [Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS, 2014](#)):

---

<sup>1</sup>Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS - <https://www.iis.fraunhofer.de>; Letzter Zugriff: 05.04.2018

- **Cyber** bezeichnet den Teil der Systeme, die sich in der digitalen Welt abspielen, verteilte Intelligenzen, Kommunikation
- **Physical** beschreibt die reale physische oder analoge Welt, von der Natur bis zu industriellen Anlagen ist inzwischen fast alles durch Sensoren erfasst, kann mit seiner Umgebung kommunizieren und seinen Status mitteilen und ist so in der digitalen Welt abgebildet
- **System** erfüllt einen Zweck wie das Lösen eines Problems oder einer Aufgabe und besteht oft aus diversen Subsystemen die einzelne Aufgaben übernehmen, z.B. Industrieanlagen oder im Ubiquitous Computing

Cyber Physical Systems sind also physische Systeme, die durch Ausstattung mit Rechenleistung, Kommunikationsmöglichkeiten und Sensoren sowohl dazu in der Lage sind, ihren Status in der digitalen Welt bekannt zu machen, als auch überwacht, gesteuert und in computergesteuerte Prozesse integriert zu werden. Diese Systeme reichen inzwischen von kleinsten physischen Objekten bis hin zu großen über weite Flächen verteilte Systeme wie Fabriken oder auch über mehrere Standorte verteilte Firmen, die unterschiedliche Prozesse ausführen und durch die Vernetzung automatisieren und koordinieren. (vgl. [Rajkumar u. a., 2010](#))

In einem CPS kommen also 2 grundlegende Dinge zusammen:

- **Embedded Systems** (eingebettete Systeme) sind die Geräte oder Gegenstände, die mit Prozessor und ähnlichem ausgestattet sind und ein physisches Gerät steuern. Meist haben eingebettete Systeme eine feste Funktion und können zwar von außen bedient aber nicht verändert werden. Beispielsweise eine Waschmaschine, welche vom Anwender bedient und gestartet werden kann, aber nur vom Hersteller programmiert wird, bevor sie ausgeliefert wird. (vgl. [Reddy, 2002](#))
- **Vernetzung und Kommunikation** zwischen eingebetteten Systemen ist erforderlich um die einzelnen Systeme zusammen arbeiten und interagieren zu lassen. Der Austausch von Informationen und Daten ist ein entscheidender Faktor um ein CPS erfolgreich zu betreiben. Die Informationen müssen nicht nur innerhalb eines Gebäudes verteilt, sondern teilweise um die ganze Welt verschickt werden, um alle Systeme aufeinander abzustimmen und zu koordinieren.

Ein einzelnes System kann über Sensoren, Aktoren und Nutzerschnittstellen mit der Umgebung interagieren und über die Vernetzung entsteht ein komplexes Netzwerk von Systemen, die untereinander Informationen und Anweisungen austauschen um Aufgaben zu lösen. Durch die Präsenz in der realen und der digitalen Welt werden physische Probleme oder Aufgaben in der digitalen Welt gelöst und können über die Schnittstelle zur realen Welt auch hier gelöst werden.

Um sowohl in der realen als auch in der digitalen Welt interagieren und auf

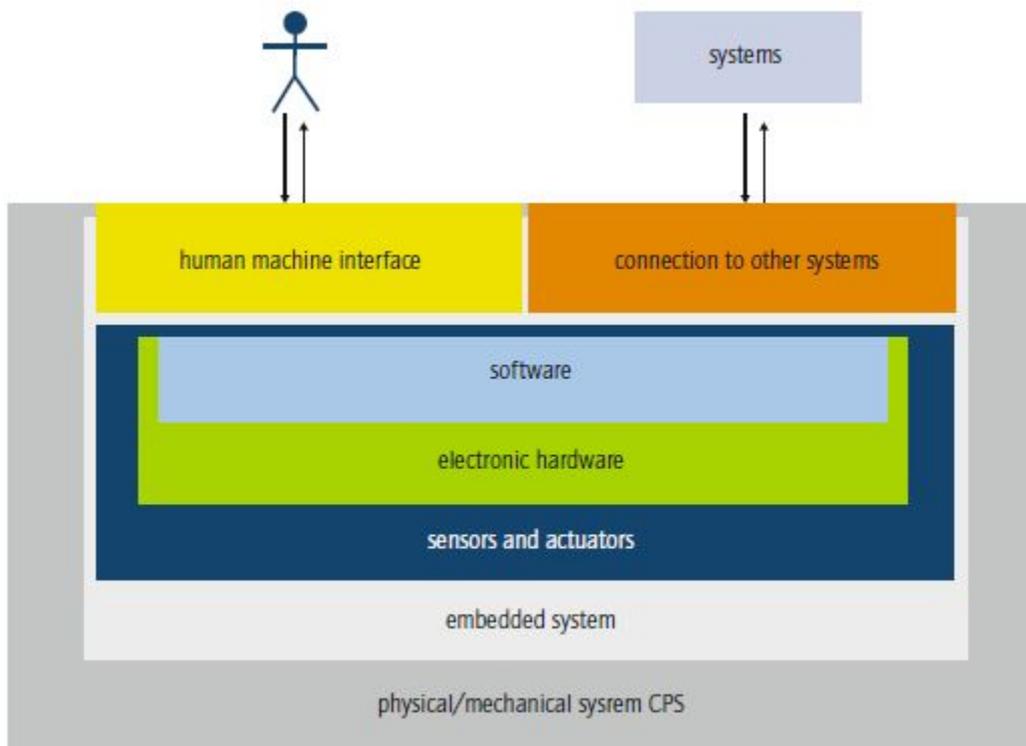


Abbildung 2.1: Zwiebelschalenarchitektur von Cyber Physical Systems (vgl. [Broy, 2010](#))

Veränderungen und Einflüsse reagieren zu können, müssen die Systeme mit Sensoren und Aktoren ausgestattet sein. Die Sensoren nehmen Daten aus der Umgebung auf und stellen diese dem CPS zur Verfügung. Bei Änderungen, die aus der digitalen Welt veranlasst werden, müssen entsprechende Aktoren vorhanden sein, welche die Befehle aus dem CPS in der realen Welt umsetzen. Beispielsweise können Motoren beschleunigt oder gebremst oder Schalter ein- bzw. ausgeschaltet werden. (vgl. [Broy,](#)

2010)

In [Abbildung 2.1](#) wird schematisch der Aufbau eines CPS dargestellt. Schaut man Ebene für Ebene tiefer in ein CPS hinein, kommt man über die eingebetteten Systeme, deren Sensoren und Aktoren zur eigentlichen Hard- und Software. Die Interaktion findet in der Regel auf Ebene der Embedded Systems statt und kann sowohl zwischen User und System, als auch zwischen verschiedenen Systemen stattfinden.

[Abbildung 2.2](#) wiederum stellt den Nutzen von Interoperabilität einzelner CPS dar.

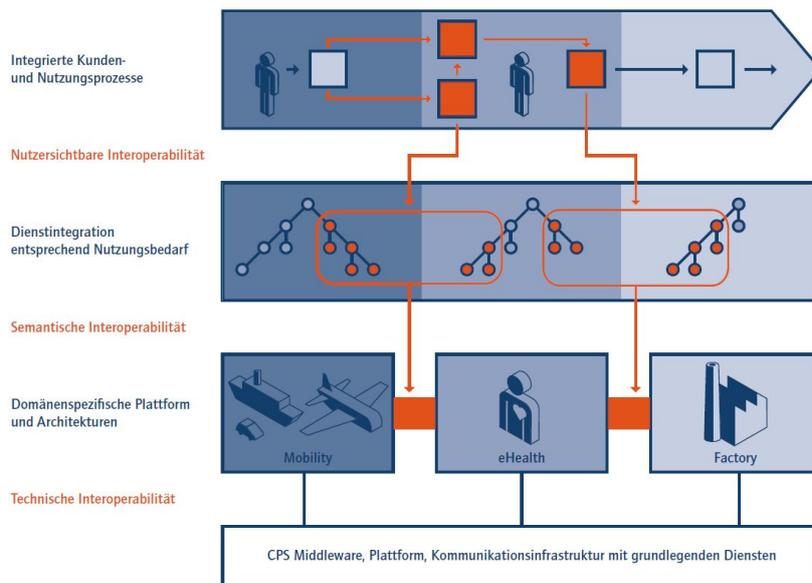


Abbildung 2.2: Idealtypisches Schichtenmodell der Cyber-Physical Systems (vgl. [acatech, 2011](#))

Über die Kommunikationsinfrastruktur oder Middleware können domänenspezifische Systeme untereinander kommunizieren, hierzu ist eine technische Interoperabilität notwendig, was bedeutet, dass die Systeme auf kompatible Techniken zurückgreifen müssen, um Daten auszutauschen. Entsprechende Dienste, die einen gezielten Zugriff ermöglichen, müssen fachlich kompatibel sein, um eine einheitliche Interpretation der Daten sicher zu stellen. Der wichtigste Punkt ist jedoch, dass die Informationen aus den verschiedenen Bereichen, Diensten und Anwendungen auf die ein Nutzer zugreift, semantisch Interoperabel sind. Nur dann können sich die Systeme untereinander auch „verstehen“.

Das Potential von Cyber-Physical Systems lässt sich nur schwer darstellen, da es di-

verse Ansätze und Visionen gibt, die einen Teil von CPS darstellen oder ein Teil davon werden können. Als Beispiele lassen sich hier *Ubiquitous Computing* und das *Internet of Things* nennen, die in den nächsten Abschnitten noch genauer behandelt werden. Durch die stetige Weiterentwicklung im informationstechnischen Bereich werden immer mehr analoge Geräte vernetzt. Auch immer mehr mobile und ortsunabhängige Geräte, angefangen von Smartphones bis hin zu Flugzeugen, sind vernetzt und können Daten liefern oder von anderen entfernten Systemen gesteuert werden.

Grade in großen, globalen Bereichen wie der Industrie, Energie oder dem Gesundheitswesen können Cyber-Physical Systems die immer weiter verbreiteten Embedded Systems kontrollieren, steuern und koordinieren. Durch diese computergesteuerte Umgebung lassen sich nicht nur Abläufe automatisieren, es können auch Energie- und Rohstoffverbrauch sowie Abfall oder Abwasser reduziert werden (vgl. [Broy, 2010](#)).

Trotz der globalen Ausmaße darf nicht auf Flexibilität verzichtet werden. Nicht nur die stetige Weiterentwicklung von Technologie, auch die Veränderung des Umfeldes muss von den Systemen abgefangen werden. In sämtlichen Bereichen, im öffentlichen, industriellen und privaten, können Cyber-Physical Systems zum Einsatz kommen. Überall muss gewährleistet werden, dass die Bedingungen unter denen die Daten gesammelt werden ebenso mit in die Analyse und Verarbeitung einfließen wie die Daten selber.

Da diese Daten überall und zu allen möglichen Dingen gesammelt werden, muss im Bereich von Cyber-Physical Systems auf jeden Fall ein großes Augenmerk sowohl auf Security als auch auf Safety gelegt werden. Im deutschen Sprachgebrauch sind diese beiden Begriffe gerne unter „Sicherheit“ zusammen gefasst. Genauer müssen aber beide Begriffe einzeln betrachtet werden (vgl. [Waltz, 2017b](#)):

- **Safety** bezeichnet die Betriebssicherheit, also die funktionale Sicherheit der Maschine oder Anlage. Es soll ein reibungsloser und normaler Betrieb sichergestellt und sowohl Anlagen als auch Benutzer vor Gefahren geschützt werden.
- **Security** ist die Sicherheit gegen (unbefugte) Beeinflussung von außen. Unter diesem Begriff werden alle Maßnahmen zusammen gefasst, die nötig sind um die Betriebssicherheit eines Systems sicher zu stellen. Außerdem werden ungewollte Aktionen abgefangen und behandelt.

Da Cyber-Physical System in nahezu allen Bereichen integriert sein können und sich jedes Embedded System darüber abfragen und kontrollieren lässt, muss sowohl Safety

als auch Security gewährleistet sein. Heutzutage werden in allen Bereichen Daten gesammelt, über Systeme, Personen oder Umgebungen, diese Daten können sensibel sein und dürfen nicht gestohlen oder missbraucht werden. Dies ist sowohl bei der Sammlung, der Verarbeitung als auch bei der Aufbewahrung der Daten zu berücksichtigen und umzusetzen.

In [Abbildung 2.3](#) ist die Kommunikation von 2 CPS aus unterschiedlichen Anwen-

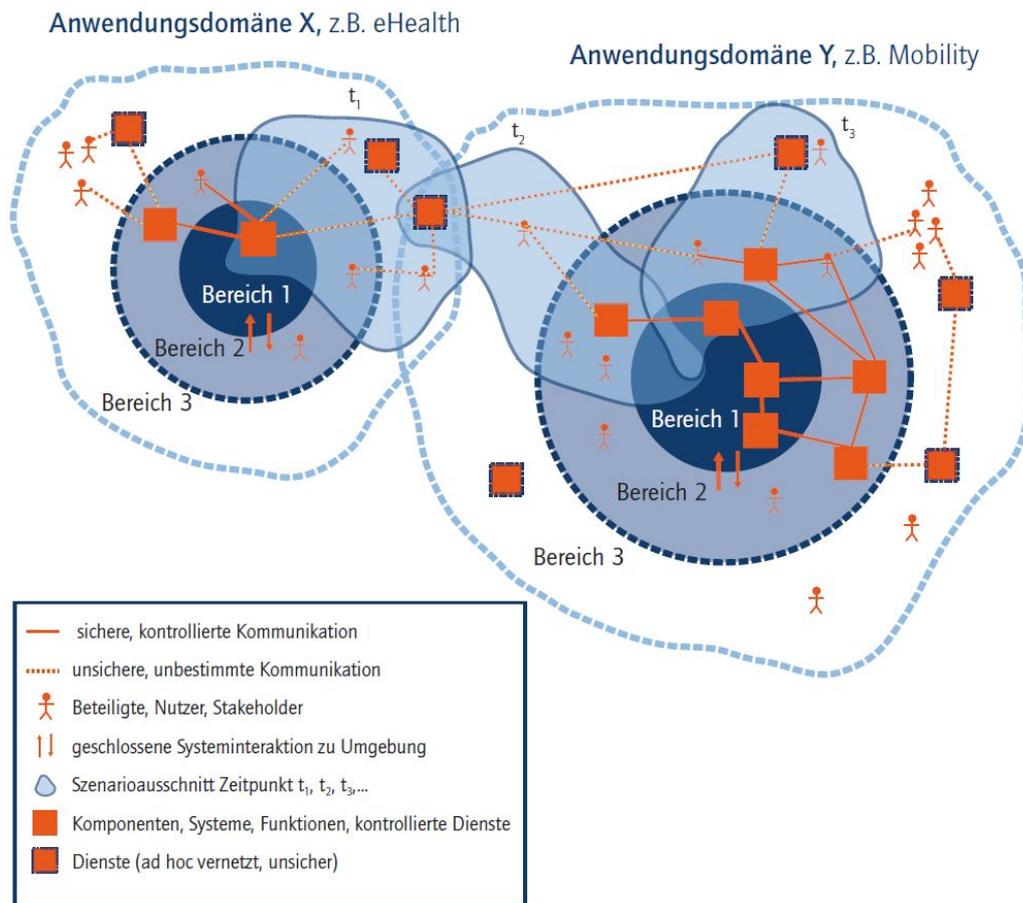


Abbildung 2.3: Domänenübergreifende Vernetzung von Cyber-Physical Systems (vgl. [acatech, 2011](#))

dungsgebieten dargestellt. Oft kommt es vor, dass Daten zwischen solchen Domänen ausgetauscht werden müssen. Die Kommunikation innerhalb dieser Bereiche ist in der Regel gesichert und kontrolliert. Die Kommunikation zwischen den Domänen hingegen

verläuft meist über Kanäle, die sich nicht so einfach kontrollieren lassen (z. B. das Internet) und auch hier müssen Safety und vor allem Security greifen. Es können Daten vor dem Verschicken verschlüsselt oder der Zugriff auf die Systeme und Daten eingeschränkt werden, so dass nur authentifizierte User oder Systeme zugreifen können.

Um Cyber-Physical Systems immer weiter entwickeln und voranbringen zu können, müssen Herausforderungen in diversen Bereichen gemeistert werden. Modelle und Entwurfsmethoden müssen auf weit vernetzte Systeme angepasst und entwickelt werden, da hier sowohl physikalische Systeme, Elektronik und Software zum Einsatz kommen, die komplett aufeinander abgestimmt werden müssen.

Das Aushängeschild für Cyber-Physical Systems können in Deutschland bis 2025 vor allem die folgenden großen Anwendungsbereiche werden (vgl. [acatech, 2011](#)):

- **Energie** Die Umstellung der Energieversorgung auf sogenannte „Smart Grids“ benötigt sehr viel Informationsaustausch. Smart Grids setzen zum Großteil auf erneuerbare Quellen wie Wind und Sonne, diese sind aber nicht immer direkt verfügbar. Es müssen Speicher angezapft werden, die bei guter Produktion gefüllt werden. Diese Umschaltung muss passieren, ohne dass der Strom ausfällt. Informationen und Prognosen zu Wetter, Produktion oder Verbrauch müssen in Echtzeit ausgewertet werden um darauf zu reagieren.
- **Mobilität** Der Verkehr zu Land, zu Wasser oder in der Luft kann komplett überwacht und gesteuert werden, um Störungen festzustellen, darauf zu reagieren oder sie sogar zu vermeiden. Die Überwachung der Verkehrslage kann in modernen Systemen dazu genutzt werden, Fahrzeuge und Fahrer mit Informationen zu versorgen, um auf Staus und Unfälle zu reagieren oder diese durch intelligente Assistenzsysteme zu verhindern.
- **Gesundheit** Im Bereich der medizinischen Versorgung lassen sich viele Parameter bereits über geeignete Sensoren erfassen und durch Smart-Health-Systeme überwachen. Die Verarbeitung der Daten durch ein CPS ermöglicht es, auch hier auf bedrohliche Situationen schnell zu reagieren. Das betreute Wohnen älterer Menschen ermöglicht so eine umfassende Betreuung 24 Stunden am Tag, ohne dass die Betroffenen ihr zu Hause verlassen müssen. Solche Ferndiagnosen erleichtern oftmals den Alltag erheblich.
- **Industrie** Die Vision von Industrie 4.0 in Deutschland sieht eine Verknüpfung

der Produktion mit Informations- und Kommunikationstechnik vor. Die Koordination von Menschen, Maschinen, Anlagen, Logistik und Produkten erfordert eine weitreichende und direkte Kommunikation. „Smart Factories“ sollen hier auf der Grundlage von intelligenten, vernetzten Systemen größtenteils eigenständig arbeiten und so die Produktion noch effizienter und flexibler durchführen. (vgl. [Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2018](#))

Zusammenfassend lassen sich mit Cyber-Physical Systems nicht nur (Arbeits-) Abläufe optimieren und Kosten sparen, es lassen sich auch Gefahren vermeiden, Abfall verringern und Energie sparen. Dies setzt aber voraus, dass sämtliche Systeme komplett in die CPS-Welt integriert sind.

### 2.3 Ubiquitous Computing

Den Begriff „Ubiquitous Computing (UbiComp)“ hat Mark Weiser in seiner Publikation „The computer for the 21st century“ im Jahre 1991 geprägt. Er beginnt mit dem Satz „The most profound technologies are those that disappear.“ [Weiser \(1999\)](#). Mit dem Verschwinden ist hier gemeint, dass die Technologie soweit in den Alltag integriert wird, bis sie nicht mehr auffällt. „Ubiquitous Computing“ beschreibt genau diesen Ansatz: Computer werden immer mehr in alltägliche Dinge integriert. Dies ist darauf zurück zu führen, dass die Computer immer kleiner werden und sich so immer besser verstecken und integrieren lassen. Von kleinsten Sensoren, die einfach nur Daten liefern über selbstauskunftsfähige Alltagsgegenstände (z.B. Tassen oder Pflanzen) bis hin zu großen Maschinen, wie z.B. Aufzügen, ist heutzutage nahezu alles mit einem oder mehreren Computern ausgestattet. Die Vernetzung der Geräte ist durch immer leistungsstärkere und energiesparendere Technologien immer einfacher. Reichweiten steigen und die Energieversorgung kann über einfache Batterien erfolgen, die erst nach Monaten oder sogar Jahren ausgetauscht werden müssen, im besten Fall erfolgt die Energieversorgung autonom mit Hilfe von Solarzellen oder Ähnlichem. In seiner Vision beschreibt Weiser die Verschmelzung von Computern mit der Umwelt und den alltäglichen Gegenständen. Dabei ging es ihm nicht allein um Displays auf denen man etwas ablesen konnte. Er beschreibt sehr genau Geräte, mit denen Menschen auch interagieren. Weiser spricht z.B. von Pads und Tabs, zu sehen in [Abbildung 2.4](#),

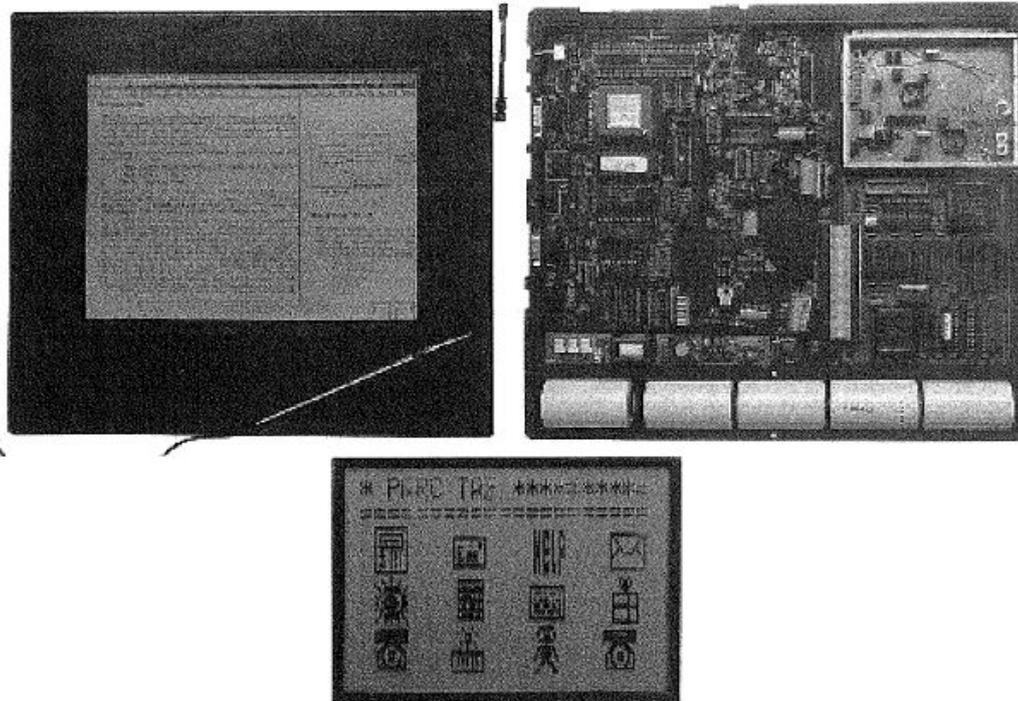


Abbildung 2.4: Mark Weiser's Key Components for Ubiquitous Computing (vgl. [Weiser, 1999](#))

wobei die Pads heutigen Tablets entsprechen, die Tabs aber wesentlich kleiner sind. Beide besitzen damals bereits die Möglichkeit zur Eingabe per Stift oder Buttons. Laut Weiser wird später jedes Haus oder Büro mehrere hundert solcher Geräte besitzen. (vgl. [Weiser, 1999](#))

Ganz unrecht hatte er damit nicht, Smartphones und Tablets sind heute im Alltag nicht mehr wegzudenken, aber es haben sich noch einige weitere Dinge entwickelt. So lassen sich inzwischen alltägliche Dinge mit Mikroprozessoren oder Sensoren ausstatten und werden so Teil der digitalen Welt. Diese Dinge sind umgangssprachlich unter dem Begriff „Internet der Dinge (eng. Internet of Things - IoT)“ zusammengefasst. Diese sogenannten „*Smart-Objects*“ beinhalten je nach Größe und Einsatzgebiet sehr kleine und sparsame Prozessoren. Der Michigan Micro Mote (M<sup>3</sup>) ist einer der kleinsten Computer der Welt und enthält in seinen 2 x 4 x 4mm unter anderem Prozessor, Speicher, Batterie und ein Funk-Modul (vgl. [University of Michigan, 2015](#)).

### 2.3.1 Internet of Things (IoT)

Der weitaus geläufigere und umfassendere Begriff für Cyber Physical Systems und Ubiquitous Computing ist das Internet der Dinge (engl. Internet of Things). Seit dem ersten Auftauchen des Begriffs in einer Präsentation von Kevin Ashton (vgl. [Ashton, 2009](#)) im Jahr 1999 ist das Internet of Things nicht nur auf dem Papier überall vertreten. Die Verbreitung von vernetzten Objekten steigt stetig weiter und es werden immer mehr Alltagsgegenstände selbstauskunftsfähig und können ihren Status in der digitalen Welt verbreiten. Hierzu werden Objekte, wie z. B. eine Tasse, mit Sensoren und drahtloser Kommunikation ausgestattet und kann so ihre Temperatur oder ihren Standort mitteilen (vgl. [CSTI, 2017b](#)).

## 2.4 Industrie 4.0

Dieser Abschnitt der Analyse befasst sich mit dem Begriff „Industrie 4.0“, seiner Definition, der Entwicklung und dem Zusammenspiel zwischen Mensch und Maschine.

### 2.4.1 Definition

Der Begriff „Industrie 4.0“ ist eine in Deutschland geprägte Bezeichnung für die Verknüpfung von Produktion mit Informations- und Kommunikationstechnik. Mittlerweile in aller Munde, haben das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie und das Bundesministerium für Bildung und Forschung vor einigen Jahren einen Arbeitskreis zum Thema Industrie 4.0 ins Leben gerufen. Dieser erstellte bis Oktober 2012 einen Bericht mit dem Titel „Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0“. Diese Empfehlungen wurden von den Verbänden BITKOM<sup>2</sup>, VDMA<sup>3</sup> und ZVEI<sup>4</sup> aufgegriffen und im April 2013 gründeten sie Verbandsübergreifend die „Plattform Industrie 4.0“ um einheitliche, verlässliche Rahmenbedingungen und Standards zu schaffen. Zwei Jahre später wurden weitere Akteure aus Unternehmen,

---

<sup>2</sup>BITKOM - <https://www.bitkom.org>; letzter Zugriff: 20.05.2018

<sup>3</sup>VDMA - <https://www.vdma.org>; letzter Zugriff: 20.05.2018

<sup>4</sup>ZVEI - <https://www.zvei.org>; letzter Zugriff: 20.05.2018

Verbänden, Gewerkschaften, Wissenschaft und Politik hinzugewonnen. (vgl. [Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2018](#))

In [Abschnitt 2.2](#) beschriebene vernetzte und eingebettete Systeme bilden die Grundlage für die Weiterentwicklung der Industrie. Hierbei soll die Produktion möglichst automatisch ablaufen und alle beteiligten Parteien durch direkte Kommunikation und Zusammenarbeit koordiniert werden. Menschen, Maschinen, Anlagen, Logistik und Produkte sind digitalisiert, haben eine digitale Präsenz, die diese Person oder das Objekt in der digitalen Welt verkörpert. Dadurch lassen sich Informationen, Befehle, Umstellungen oder Abfragen automatisch und direkt übermitteln, ohne dass zunächst ein Mensch die notwendigen Schritte einleiten muss.

### 2.4.2 Vorteile von Industrie 4.0

Der wohl größte Vorteil von der Digitalisierung und Automatisierung von Produktionsprozessen ist, dass die Entscheidungen auf Grundlage von gesammelten Daten nahezu in Echtzeit getroffen werden können. Die Verarbeitung von aktuellen Daten und die Erstellung von Prognosen auf dieser Grundlage ermöglicht es, eine Produktion effizient auf jede Situation anzupassen. Eine Studie zeigte, dass Firmen, welche auf Grundlage von gesammelten Daten Entscheidungen getroffen haben, eine um 5-6% höhere Produktivität hatten, als andere (vgl. [Brynjolfsson u. a., 2011](#)). Die Entscheidungsfindung basiert hierbei auf einem „BigData“- und „Machine Learning“-Prozess, bei dem Wissen aus Daten gewonnen wird. Je mehr Daten gesammelt werden, desto bessere Entscheidungen und Prognosen können getroffen werden. Im Konzept von Industrie 4.0 ist vorgesehen, dass Cyber-Physical Systems Daten von allen Beteiligten sammeln, speichern und auswerten um auf dieser Grundlage automatisch zu agieren. Die Entscheidungen sollen überwiegend autonom getroffen werden. Das bedeutet, ein System steuert ein anderes auf Grundlage gesammelter Daten. So können beispielsweise Bestellvorgänge bei Zulieferern ausgelöst werden um Lagerkosten klein zu halten oder die Produktionsmenge wird auf Grund der Nachfrage angepasst. Dies wird diverse weitere Umstellungen in der Produktion zur Folge haben, die aber vom System direkt mit ausgelöst werden. Der Mensch übernimmt weniger Verantwortung und hat eine mehr kontrollierende Rolle, die eigentliche Produktion übernehmen

(soweit möglich) Maschinen.

### 2.4.3 Entwicklung

Seit dem Jahr 2011 ist der Begriff „Industrie 4.0“ als Synonym für die Digitalisierung des Industriebereichs weit verbreitet. Oft auch bezeichnet als „Die vierte industrielle Revolution“. Wie in [Abbildung 2.5](#) zu sehen, sind die Schritte zur Mechanisierung, Industrialisierung und Automatisierung längst abgeschlossen. Der Schritt von der Au-

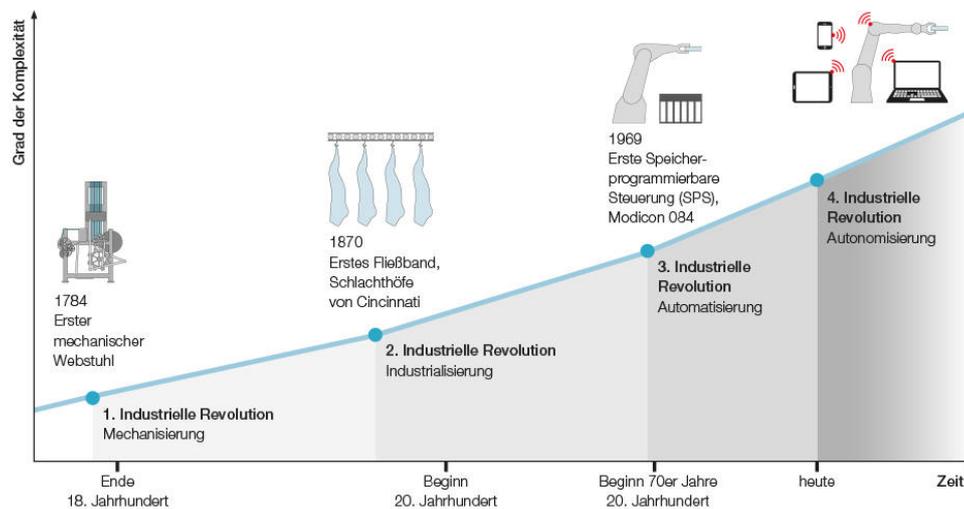


Abbildung 2.5: Geschichte und Hintergrund Industrie 4.0 [Pilz \(2018\)](#)

tomatisierung zur Autonomisierung scheint kein all zu Großer zu sein, da Grundlagen in Form von Maschinen, wie z. B. Industrierobotern, schon vorhanden sind. Die eigentliche Revolution liegt aber in der Steuerung dieser Systeme und Anlagen. Wie schon im vorangegangenen Abschnitt beschrieben, basiert die Steuerung der vernetzten Systeme auf den gesammelten Daten von Sensoren und anderen Systemen. Diese Daten müssen ausgewertet, verknüpft und interpretiert werden, was alles in Echtzeit geschehen muss um die gesamte Produktionskette effizient zu steuern. Die im Hintergrund agierenden Cyber-Physical Systems sind sehr umfassend aufgebaut und können die

Steuerung untereinander autonom durchführen. Zur Sammlung und Verarbeitung der Daten müssen dennoch neue Infrastrukturen geschaffen werden: Data Warehouses und Rechenzentren in denen die Daten zu verwertbaren Informationen interpretiert werden, Vernetzung von Systemen und Maschinen, Integration von Sensoren und Aktoren und die Verbindung zwischen allen Komponenten müssen aufgebaut und integriert werden. Zu guter Letzt muss auch der Mensch noch in dieses System passen, aber die Rolle wird immer mehr in Richtung Kontrolle der Prozesse und Arbeiten tendieren. Ein weiterer sehr wichtiger Aspekt ist die Vorhersagbarkeit von Wartungsarbeiten (engl. Predictive Maintenance), welche mit Hilfe der Sensoren von Cyber-Physical Systems möglich gemacht wird. Da diese Sensoren jedes Teil einer Maschine überwachen können, ist es möglich, anhand der Abnutzung, der Laufzeiten oder Lasten vorherzusagen, wann an welcher Stelle eine Wartung ansteht. Viele Wartungen werden heutzutage präventiv durchgeführt, d.h. es werden Teile ausgetauscht, obwohl sie noch nicht komplett abgenutzt sind, um Schäden zu vermeiden. Ein Ölwechsel bei einem Auto wird beispielsweise entweder alle 15.000km oder nach einem Jahr durchgeführt, je nachdem was zuerst eintritt. Die vielen Faktoren, die in die Verschmutzung des Motoröls einfließen, werden hierbei nur generell betrachtet und es wird nicht auf das jeweilige Fahrzeug, den Fahrstil des Benutzers etc. eingegangen. Stattet man nun ein Auto mit entsprechenden Sensoren aus, lassen sich Daten sammeln, die dabei helfen können, sowohl das Öl als auch die weiteren Komponenten des Motors zum optimalen Zeitpunkt warten zu lassen (vgl. [Hilton, 2013](#)). Dieses Szenario lässt sich auf sämtliche mechanischen Geräte oder Anlagen anwenden, die Wartung an Verschleißteilen benötigen. In den folgenden Abschnitten werden einige der Konzepte in Form von Virtual und Augmented Reality weiter behandelt.

### 2.5 Virtuelle Realitäten

In diesem Abschnitt werden virtuelle und erweiterte Realitäten betrachtet. Virtual Reality (VR) und Augmented Reality (AR) sind schon seit Jahrzehnten ein Begriff aber erst in den letzten Jahren wurden die Technologien so weit entwickelt, dass sie großflächig zum Einsatz kommen können. So unterschiedlich diese beiden Techniken auch sind, es gibt dennoch einige Berührungspunkte und Überschneidungen.

### 2.5.1 Mixed Reality (MR)

Mixed Reality bezeichnet sämtliche Verbindungen von realer und virtueller Umgebung. Wie in [Abbildung 2.6](#) zu sehen, bewegen sich die Umgebungen von real zu

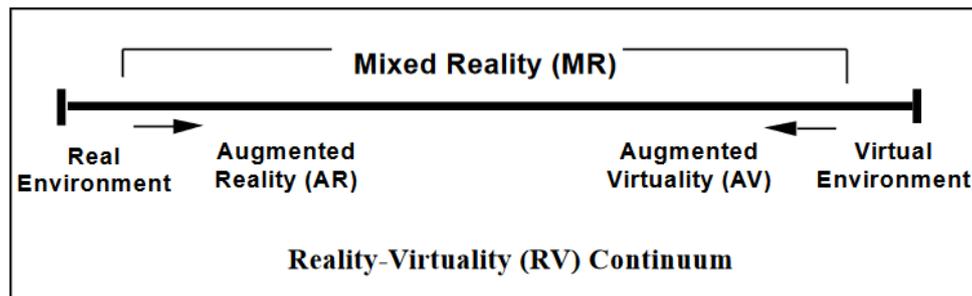


Abbildung 2.6: Schematische Darstellung von Mixed Reality (vgl. [Milgram u. a., 1995](#))

virtuell entlang von Abstufungen, die immer mehr in die reale oder virtuelle Richtung tendieren. Augmented Reality ist beispielsweise eine reale Umgebung, angereichert mit virtuellen Elementen. Augmented Virtuality hingegen ist eine virtuelle Umgebung, die mit realen Elementen angereichert wird. So entstehen sowohl in realen als auch in virtuellen Umgebungen Berührungspunkte mit der jeweils anderen Umgebung.

Wie [Tabelle 2.1](#) aus dem Paper von Milgram und Takemura zeigt, gibt es verschie-

Class of MR System	Real (R) or CG world?	Direct (D) or Scanned (S) view of substrate?	Exocentric (EX) or Egocentric (EG) Reference?	Conformal Mapping (1:1), or not (1:k)?
1. Monitor-based video, with CG overlays	R	S	EX	1:k
2. HMD-based video, with CG overlays	R	S	EG	1:k
3. HMD-based optical ST, with CG overlays	R	D	EG	1:1
4. HMD-based video ST, with CG overlays	R	S	EG	1:1
5. Monitor/CG-world, with video overlays	CG	S	EX	1:k
6. HMD/CG-world, with video overlays	CG	S	EG	1:k
7. CG-based world, with real object intervention	CG	D, S	EG	1:1

Tabelle 2.1: Unterschiede in der Klassifizierung von Mixed Reality Displays (vgl. [Milgram u. a., 1995](#))

dene Klassen von Mixed Reality Displays, die sich alle in mindestens einem Punkt unterscheiden. Die Klassifizierungen gehen hier von Monitor basierten Videos der realen Welt mit computergenerierten Überlagerungen (Video See-Through-Technik), über HMD-basierte optische Darstellungen der realen Welt mit computergenerierten Überlagerungen (Optische See-Through-Technik), bis hin zu computergenerierten Welten mit Einflüssen von realen Objekten. Jede einzelne dieser Klassen findet ihre eigenen Anwendungsbereiche. Einige davon werden in den folgenden Abschnitten weiter behandelt.

### 2.5.2 Virtual Reality (VR)

Virtuelle Realität ist spätestens seit dem Holodeck aus Star Trek oder den Filmen Tron oder Matrix ein Begriff.

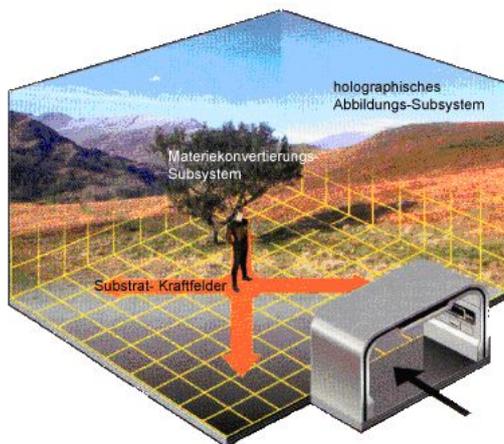
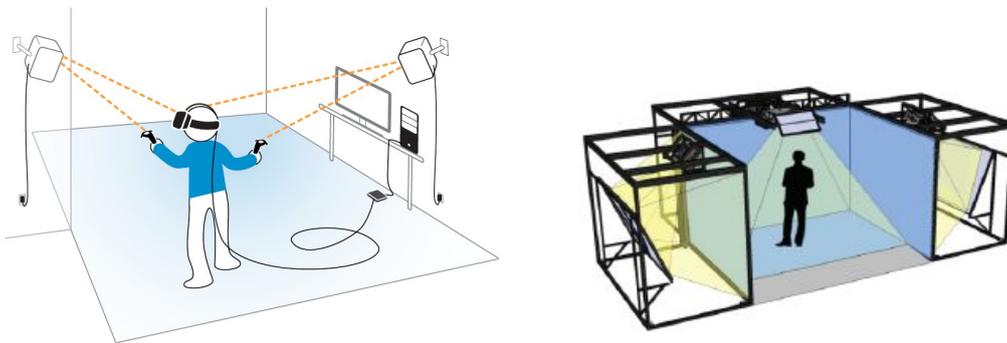


Abbildung 2.7: Konzept Holodeck (DeSF)

Diese Vision entspricht ziemlich genau dem, was ein Holodeck aus Star Trek leisten kann. Die Entwicklung der virtuellen Realitäten ist zwar noch nicht so weit, Materie in einem Raum kontrollieren zu können, aber die Fortschritte im Bereich der Displays und Projektionen sind enorm. In [Abbildung 2.7](#) sieht man ein Konzept eines Holodecks, aber wie zu erkennen, ist die Grundlage auch hier ein einfacher Raum, der Bilder anzeigt. Hinzu kommen noch die generierten Objekte wie Bäume etc. Hier

Es geht darum, einen Menschen in eine komplett virtuelle Umgebung zu bringen, in der er sich frei bewegen und mit der er interagieren kann.

Die Entwicklung der ersten Ansätze zu virtuellen Welten geht schon einige Jahrzehnte zurück. Bereits 1965 hatte Ivan Sutherland die Vision eines „ultimativen Displays“, welches bereits in seiner Vision ein Raum wäre, in dem ein Computer in der Lage ist, die Materie zu kontrollieren.



(a) Head-Mounted Display, schematische Darstellung (vgl. [Go2Android, 2016](#)) (b) CAVE Umgebung, schematisch dargestellt (vgl. [Visbox, Inc., 2016](#))

Abbildung 2.8: Gängige VR-Technologien

muss man heutzutage noch mit Mixed-Reality-Ansätzen arbeiten, welche noch in einem folgenden Kapitel beschrieben werden. Die heutzutage gängige Technologie zur Umsetzung von VR-Umgebungen sind sogenannte „Head-Mounted Displays (HMD)“ oder CAVE-Umgebungen (Cave Automatic Virtual Environment).

In Abbildung 2.7 sind die beiden Technologien dargestellt: In [2.8a](#) ist ein HMD zu sehen, welches mit einigen Zusatzinstallationen wie Sensoren und Controllern zur Gestenerkennung arbeitet. In [2.8b](#) sieht man eine CAVE, bei der sowohl auf die Seitenwände Bilder projiziert werden, als auch von oben in den Raum hinein.

Um das VR-Erlebnis für den Anwender möglichst real erscheinen zu lassen, müssen diverse Aspekte berücksichtigt und umgesetzt werden. Zu den technischen Aspekten kommen noch der Anwender und die zu bewältigende Aufgabe hinzu. Hierzu sollten drei Hauptkomponenten vorhanden sein (vgl. [Burdea und Coiffet, 2003](#)):

- **Input/Output Devices** - Zur Interaktion des Users mit der Umgebung und umgekehrt.
- **VR-Engine** - Essentiell für die Darstellung der Umgebung
- **Software & Databases** - Tools zur Visualisierung und Darstellung von Inhalten

Diese drei Komponenten sind eng miteinander verknüpft, um dem Anwender eine Umgebung zu schaffen in der eine Aufgaben- oder Problemstellung gelöst werden kann. Beispielsweise lassen sich moderne Flugsimulatoren per Software auf neuere Modelle

umstellen, indem man die Software oder die Daten in der Datenbank entsprechend updated. Früher mussten an dieser Stelle immer neue Simulatoren gebaut und die alten entsorgt werden. Je mehr die Inhalte von Computern anhand von Daten generiert werden, desto leichter und kostengünstiger ist der Umstieg auf eine neue Version. Die kann auch im raschen Fortschritt von Industrie 4.0 von Vorteil sein, wenn immer schneller neue Maschinen entwickelt werden, mit denen ein Anwender in kürzester Zeit wieder arbeiten soll.

Drei weitere wichtige Aspekte von VR sind die 3 I's, zu sehen in [Abbildung 2.9](#). Da wäre zunächst die Immersion, auf die im nächsten Abschnitt noch genauer eingegangen wird. Das zweite I steht für Interaktion (engl. Interaction), was bedeutet, der Anwender soll mit der virtuellen Umgebung interagieren können und sie beeinflussen. Das dritte I bezeichnet die Vorstellungskraft (engl. Imagination). Da die Gegenstände in einer virtuellen Umgebung nicht wirklich vorhanden sind, ist die Vorstellungskraft dafür verantwortlich, dass ein Mensch diese nicht existierenden Gegenstände wahrnimmt und sich vorstellen kann mit ihnen zu interagieren (vgl. [Burdea und Coiffet, 2003](#)). Abhilfe schaffen kann hier eine Mixed Reality Umgebung, diese wird in einem der folgenden Abschnitte noch weiter erklärt.

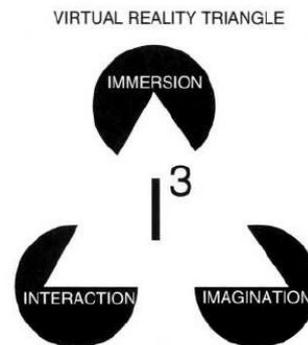


Abbildung 2.9: Virtual Reality Triangle (vgl. [Burdea und Coiffet, 2003](#))

### Tracking

Die Bestimmung der Position des Anwenders, seine Ausrichtung und vor allem seine Blickrichtung sind für die korrekte Darstellung einer VR-Umgebung von entscheidender Bedeutung. Der Vorgang dieser Bestimmung wird im allgemeinen „Tracking“ genannt.

Um die Position und Ausrichtung erfolgreich zu ermitteln und verfolgen, gibt es verschiedene Trackingmethoden (vgl. [Hoffman u. a., 2002](#)):

- **akustisches Tracking** - Bei diesem Verfahren werden Ultraschallwellen ausgesendet und von dem Objekt oder dem Anwender reflektiert. Anhand der Zeit, die das Signal vom Aussenden bis zum Auffangen des reflektierten Signals benötigt, kann die Entfernung zum Sender errechnet werden. Werden nun mindestens drei Sender genutzt, lässt sich die Position eines Objektes feststellen. Bei dieser Technik lässt sich nicht feststellen, wie eine Person oder ein Objekt ausgerichtet ist.
- **mechanisches Tracking** - Diese Art des Tracking funktioniert nur, wenn eine physikalische Verbindung zum zu trackenden Objekt hergestellt ist. Dies kann ein Arm sein, der sich bei einer Bewegung des Objektes mit bewegt. Diese Bewegung wird dann gemessen und so die neue Position festgestellt.
- **elektromagnetisches Tracking** - Diese Technik basiert auf Magnetfeldern, die mit Hilfe von stromdurchflossenen Spulen aufgebaut und durch Empfängerspulen gemessen werden können. Hier ist es möglich, bei der Nutzung von mindestens drei Spulen, die Position im Raum zu ermitteln. Die Magnetfelder lassen noch dazu eine Bestimmung der Ausrichtung zu.
- **optisches Tracking** - Das optische Tracking lässt sich in zwei Arten aufteilen: Das aktive und das passive Tracking. Passives Tracking funktioniert mit Hilfe von Infrarotkameras, Infrarotleuchtdioden und Reflektoren. Kameras und Leuchtdioden bilden hier eine Einheit und übernehmen den aktiven Part, indem sie Infrarotstrahlen aussenden, die von den Reflektoren zurückgeworfen werden, können die Kameras die Position der Reflektoren/Objekte erfassen. Bei aktivem optischen Tracking senden die Objekte selbst Infrarotstrahlen aus, welche von den Kameras erfasst werden.

Bei den gängigen VR-Brillen unterstützen Basisstationen das Tracking durch Infrarot-Laser, die entweder von der Brille ausgestrahlt und von den Basisstationen aufgefangen wird oder aber umgekehrt von den Basisstationen ausgestrahlt und von der Brille aufgefangen wird. Letztere Version kommt z.B. bei der HTC Vive zum Einsatz, wie auf [Abbildung 2.10](#) zu sehen. Durch die in den Ecken des Raumes positionierten Basisstationen kann ein Raum von etwa  $12\text{m}^2$  abgedeckt werden, die nächste Version soll  $10\text{m} \times 10\text{m}$  erfassen können (vgl. [HTC, 2018b](#)).

In dem HMD des Vive-Systems sind Sensoren verbaut, die nach genauem Einmessen die Position des Benutzers Millimetergenau bestimmen können und auch dessen

Ausrichtung berücksichtigen, wenn ein Objekt betrachtet wird. Ebenso werden die Controller samt Position und Ausrichtung erfasst. Das Tracking in reinen virtuellen

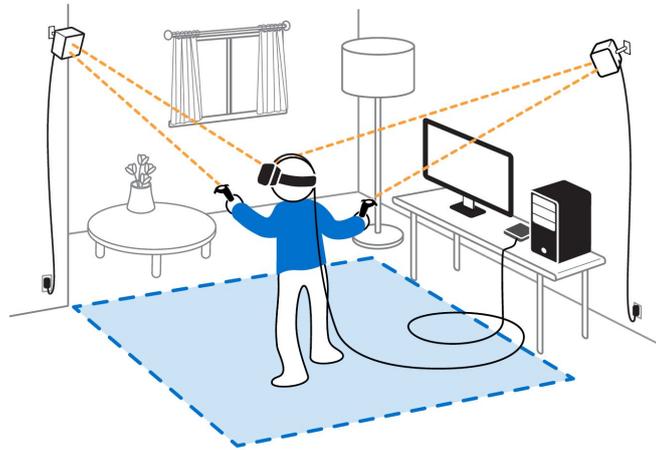


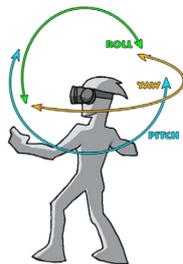
Abbildung 2.10: Funktionsweise des HTC Vive Roomscale mit den Basisstationen (vgl. [HTC, 2018a](#))

Umgebungen unterscheidet sich stark von dem in Augmented oder Mixed Reality Umgebungen, da hier auch die Positionen von realen Objekten berücksichtigt werden müssen. Die meisten VR-Brillen nutzen „Outside-In tracking“, wie das zuvor beschriebene Roomscale, bei dem externe Basisstationen die Position des HMD und der Controller ermitteln. Das Tracking-Verfahren der HoloLens ist hingegen eins der aktuellsten mit einer umgekehrten Herangehensweise: „Inside-out tracking“, arbeitet mit zwei niedrigauflösenden Schwarz-Weiß-Kameras im HMD selbst, welche Merkmale im sichtbaren Licht erkennen und diese Daten mit inertialen Messdaten kombinieren, um die exakte Position der HoloLens innerhalb der Umgebung zu bestimmen und anhand dieser Daten die virtuellen Objekte zu positionieren (vgl. [Aaron u. a., 2017](#)). Eine inertielle Messeinheit besteht aus Daten von Inertialsensoren wie z.B. Beschleunigungs- und Gyroskopsensoren oder Magnetometern, die es ermöglichen, Ausrichtung, Lage und Bewegung des HMD zu erfassen (vgl. [Wetzstein, 2018](#)). Damit diese Art von Tracking funktioniert, muss genug Licht im Raum vorhanden sein, da die Kameras die Umgebung in sichtbarem Licht erfassen. Außerdem müssen viele Eigenschaften abtastbar sein, was soviel bedeutet, dass der Raum nicht leer sein darf sondern Gegenstände, Möbel oder bauliche Eigenschaften aufweisen muss, die das System erfassen kann. Gibt es solche Punkte nicht, gibt es keine Bezugspunkte

für die Errechnung der Position.

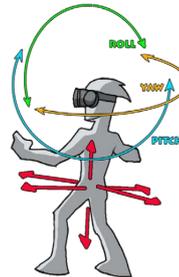
Generell ist es für ein präzises Tracking besser, je mehr Freiheitsgrade (engl. degree of freedom DOF) erfasst werden können. Drei Freiheitsgrade ermöglichen die Erfassung von Kopfbewegungen, wie in [Abbildung 2.11](#) zu sehen, sechs DOF hingegen ermöglichen es auch die Bewegung Vorwärts, Rückwärts, Seitwärts und nach Oben und Unten zu erfassen. Was bedeutet, dass der User sich in seiner Umgebung, sei es VR oder AR, frei bewegen kann.

### 3 degrees of freedom (3-DoF)



- "In which direction am I looking"
- Detect rotational head movement
- Look around the virtual world from a fixed point

### 6 degrees of freedom (6-DoF)



- "Where am I and in which direction am I looking"
- Detect rotational movement and translational movement
- Move in the virtual world like you move in the real world

Abbildung 2.11: Unterschied zwischen 3 und 6 Freiheitsgraden (vgl. [Qualcomm, 2017](#))

Tracking spielt also sowohl in virtuellen Umgebungen eine entscheidende Rolle, als auch in den folgenden Abschnitten zu erweiterter und gemischter Realität.

## Immersion

Beide zuvor genannten Techniken, HMD und CAVE, gehören zu den sogenannten „immersiven VR-Displays“. Ziel von VR-Displays ist die vollständige Immersion umzusetzen. Dies bedeutet, den Anwender möglichst perfekt in die virtuelle Welt eintauchen zu lassen. Dazu müssen einige Voraussetzungen erfüllt sein:

- Isolation des Users von der realen Umgebung, Inhalte der VR werden ausschließlich von einem Computer generiert.
- So viele Sinne wie möglich ansprechen

- Der User soll von der Ausgabe umgeben sein und nicht nur auf ein enges Sichtfeld eingegrenzt
- Hohe Auflösung, Details und Qualität sollen für eine lebendige und realistische Darstellung sorgen

Diese Eigenschaften für Immersion beschreiben M. Slater und S. Wilbur 1997 zum Thema eines Frameworks für immersive virtuelle Umgebungen (vgl. [Slater und Wilbur, 1997](#)). Die Umsetzung gelingt heutzutage immer besser, ist aber von realistischen Erlebnissen noch weit entfernt.

Schon im Jahr 1962 hat Morton Heilig seine Vision von einem „Experience Theater“ verwirklicht und den in [Abbildung 2.12](#) zu sehenden Sensorama Simulator gebaut. Dieser verfügte sowohl über 3D-Video, Kameras, Farbe und Stereo Sound, als auch Bewegungs-, Geruchs- und Wind-Effekte, was dem User eine sehr immersive Motorradfahrt durch New York vermitteln sollte, da Fahrtwind und Schlaglöcher simuliert wurden und sogar der Geruch von Essen beim Passieren eines Standes in die Simulation eingebaut wurde.

Das Eintauchen in die virtuelle Welt wird durch den Grad der Immersion bestimmt. Alle Eindrücke, die daran erinnern, dass es sich um eine virtuelle Umgebung handelt, stören die Immersion und verringern deren Grad. Ein HMD beispielsweise schirmt den Anwender gut von der Umgebung ab, bedient aber nur eine Wahrnehmung und wenn



Abbildung 2.12: Sensorama Simulator von Morton Heilig (1962) (vgl. [Heilig, 1962](#))

diese dann noch schlecht Dargestellt wird, durch unrealistische Darstellung oder hohe Latenzen, verringert dies weiter den Grad der Immersion. Je mehr sich der Anwender in die Szene hineinversetzen kann und tatsächlich das Gefühl hat, sich an dem virtuellen Ort zu befinden, desto besser ist die Präsenz der Simulation. Die Präsenz hängt zum einen von der Immersion ab, wird aber auch dadurch beeinflusst, wie fesselnd die Szene für den Anwender ist und wie gut dieser sich in die virtuelle Umgebung hineinversetzen kann.

Je mehr Sinne in der virtuellen Umgebung angesprochen werden, desto besser wird die Simulation. Allerdings müssen auch alle Sinne korrekt bedient werden, denn wenn das Gehirn widersprüchliche Informationen bekommt, kann eine Übelkeit entstehen (Cyber Sickness) (vgl. [Butz und Krüger, 2017](#)).

### 2.5.3 Augmented Reality (AR)

Augmented Reality, die erweiterte Realität, versucht nicht eine möglichst vollständige Immersion zu erreichen, wie es bei VR das Ziel ist. Hier wird die reale Welt um virtuelle Inhalte erweitert, was bedeutet, dass die virtuellen Objekte sich in die reale Welt einfügen und diese um Informationen oder Funktionen anreichert.

Im Artikel „A Survey of Augmented Reality“ definiert der Autor Ronald T. Azuma im Jahr 1997 die Eigenschaften von Augmented Reality unabhängig von Technologien wie folgt (vgl. [Azuma, 1997](#)):

- Kombiniert real und virtuell
- Ist in Echtzeit interaktiv
- Ist in 3 Dimensionen registriert

Vor über 20 Jahren schon wurde Augmented Reality testweise in verschiedenen Bereichen eingesetzt, wie z.B. als Unterstützung und Hilfe im Training in medizinischen Bereichen und in der Produktion und Reparatur, ebenso zu Anmerkungen und Visualisierungen an realen Objekten oder in Head-Up Displays in Fahr- und Flugzeugen.

Ein wichtiger Aspekt der erweiterten Realität ist, dass sie nicht statisch erweitert wird, sondern angepasst an den Standpunkt, die Blickrichtung und die Umgebung dargestellt wird. Hierzu gibt es verschiedene Ansätze:

- **Video See-Through-AR** - Das Gerät zur Darstellung von AR-Inhalten zeichnet kontinuierlich ein Videobild auf, in welches dann die virtuellen Inhalte eingebettet und das Bild dem User wieder ausgegeben wird
- **Optisches See-Through-AR** - Für diese Methode wird ein Ausgabegerät benötigt, das ein semitransparentes Display hat, da hier tatsächlich die Realität mit den virtuellen Inhalten überlagert wird. Das Display zeigt dann nur die virtuellen Inhalte an.

Bei beidem Techniken muss immer sowohl die Position als auch die Blickrichtung und -winkel bekannt sein um eine korrekte Darstellung der überlagernden Inhalte zu ermöglichen.

Beide Techniken haben ihr Vor- und Nachteile, so ist Beispielsweise die Darstellung

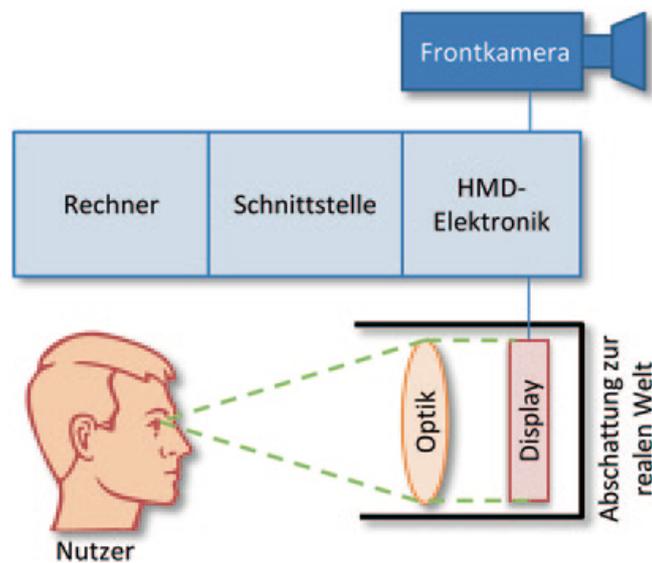


Abbildung 2.13: Video See-Through-Technik (vgl. Dörner u. a., 2013)

bei der Video See-Through-Technik (Abbildung 2.13) heller, dafür wird bei der optischen See-Through-Technik (Abbildung 2.14) die Realität direkt gesehen und nicht über ein Videobild. Bei letzterer können die virtuellen Objekte dafür leicht transparent aussehen, wogegen bei Video See-Through darauf geachtet werden muss, die virtuellen Objekte in der gleichen Auflösung wie die Umgebung gefilmt wird darzustellen, da sie sich sonst sehr stark abheben.

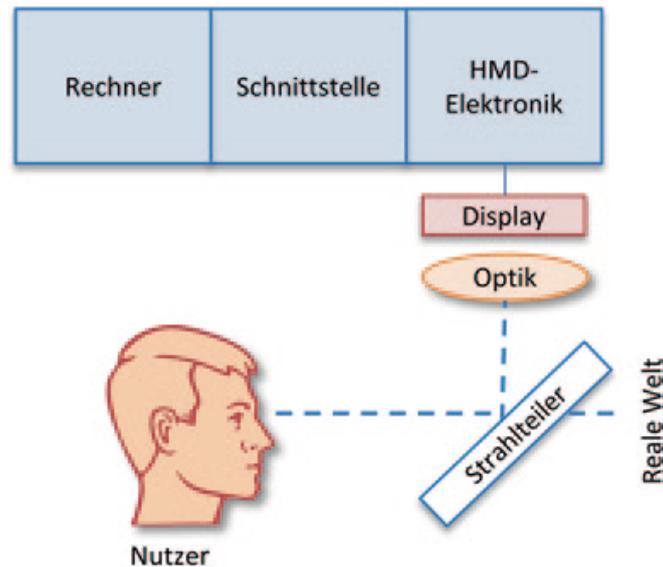


Abbildung 2.14: Optische See-Through-Technik (vgl. Dörner u. a., 2013)

Ein weiterer wichtiger Aspekt für Augmented Reality ist das Tracking, welches ermöglicht sowohl die Position als auch die Blickrichtung des Benutzers bzw. des AR-Gerätes zu bestimmen, um die virtuellen Objekte an der entsprechenden Stelle im richtigen Winkel zu positionieren. Wenn hier ein Fehler gemacht, können Objekte nicht gesehen werden, sind zum Teil mit realen Objekten überlappt oder werden vom Benutzer in einem falschen Winkel gesehen.

Um Objekte immer an der selben Stelle in der Realität darzustellen, müssen diese registriert werden. Die Grundlage für die geometrische Registrierung ist das Tracking. Die Objekte müssen im Koordinatensystem immer so positioniert werden, dass sie für den Benutzer an der selben Stelle erscheinen, egal wie dessen Position oder Blickrichtung ist.

Sind die Objekte an der entsprechenden Stelle positioniert, muss ihre Darstellung dementsprechend dem Blickwinkel des Betrachters angepasst werden. Bewegt sich der Anwender in der Szene, muss der Blickwinkel des Objektes korrekt angepasst werden.

Ein letzter wichtiger Aspekt ist die Ausgabe der Erweiterungen in die Realität. Dies geschieht in der Regel über ein Display, an dem auch die Kamera angebracht ist. Sowohl Smartphones oder Tablets eignen sich hierfür, als auch moderne Datenbrillen.

Erstere nutzen im Normalfall die Video See-Through-Technik, während Datenbrillen eher auf die Optische See-Through-Technik setzen (vgl. [Broll, 2013](#)).

Im Vergleich zu Virtual Reality ist Augmented Reality nicht dazu gedacht komplette virtuelle Welten zu erschaffen, sondern eher dazu, die reale Umgebung mit Inhalten anzureichern. Die kann über eingeblendete Informationen, Anleitungen oder Hilfestellungen passieren. An seine Grenzen stößt diese erweiterte Realität recht selten, da sie nicht nur in festgelegten Räumen genutzt werden kann. Auch im freien gibt es inzwischen schon per Smartphone abrufbare ortsgebundene Informationen, etwa zu Sehenswürdigkeiten oder anderen Points-of-Interest.

## 2.6 Interaktionskonzepte

Die Interaktion in virtuellen Umgebungen ist ein sehr wichtiger Faktor für die Benutzer. Erst die Interaktion und Einflussnahme auf die Umgebung machen eine virtuelle Welt oder virtuelle Objekte für den User realer. Um in der virtuellen Welt oder mit virtuellen Objekten interagieren zu können, müssen wie in jedem Computersystem Eingaben getätigt werden. Hierzu gibt es diverse Möglichkeiten, von den klassischen Eingabegeräten wie Maus und Tastatur bis hin zur Gesten- oder Sprachsteuerung. Bewegt man sich in einer virtuellen oder augmentierten Umgebung, sind Tastatur und Maus recht unpraktisch um Eingaben zu tätigen. In virtuellen Umgebungen bedient man sich daher meistens ein oder zwei Controllern, die gleichzeitig dazu dienen, die Position der Hände des Benutzers festzustellen. In einigen Fällen lassen sich auch mittels Sensoren die Hände erkennen, so dass auf die Controller verzichtet werden kann und die Steuerung per Gesten erfolgt. [Abbildung 2.15](#) zeigt, dass in Umgebungen mit virtuellen Elementen sechs Freiheitsgrade zu berücksichtigen sind um mit Hilfe von Tracking-Mechanismen eindeutig zu ermitteln, wo sich ein Objekt oder ein User befinden und welche Ausrichtung bzw. Blickrichtung diese haben und wie sie sich bewegen. Durch dieses Tracking lässt sich zunächst feststellen, wie ein User ein Objekt sieht, was nötig ist um ihm das Objekt korrekt anzuzeigen. Sieht ein Benutzer beispielsweise ein Menü oder einen Button nicht, kann er nicht damit interagieren.

Das Tracking ist somit ein essentieller Bestandteil der Interaktion in virtuellen Umgebungen und deckt dabei die Navigation ab. Die Interaktion selber benötigt zusätzlich noch Eingabegeräte um Objekte zu selektieren und zu manipulieren (vgl. [Butz und](#)

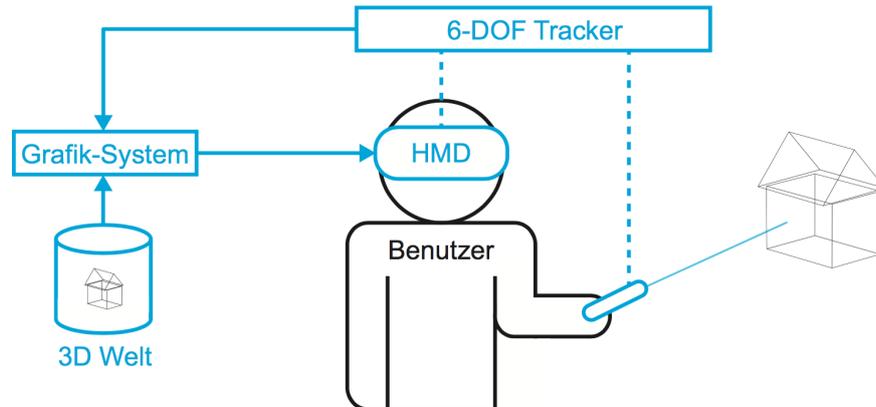


Abbildung 2.15: Prototypisches VR System mit HMD, Tracking und Eingabegerät (vgl. Butz und Krüger, 2017)

Krüger, 2017).

In Desktop-Umgebungen lassen sich Eingaben simpel per Maus und Tastatur oder per Gamepad realisieren. Bewegt sich der Anwender aber in der Umgebung umher, sind solche Eingabegeräte eher unpraktikabel, da sie zu unhandlich oder nicht intuitiv genug sind. Aktuelle Lösungen nutzen daher oft andere Eingabemöglichkeiten. In vielen

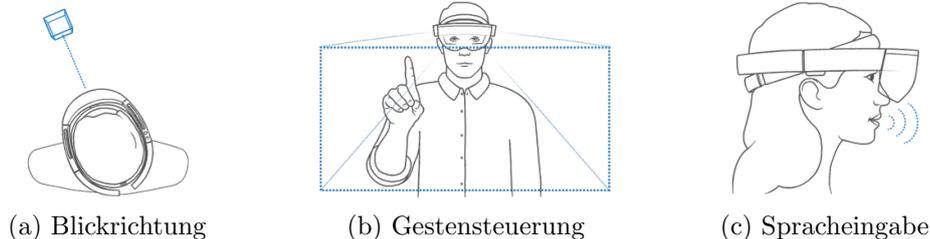


Abbildung 2.16: Verschiedene Arten der Interaktion durch ein HMD (vgl. Microsoft, 2018)

VR-Anwendungen kommen dabei spezielle Controller zum Einsatz, die mit mehreren Tasten ausgestattet sind und vom User jeweils in einer Hand gehalten werden können. So können anhand der Position und Ausrichtung der Controller die Hände des Benutzers getrackt werden. Dies kann ebenfalls durch die Kombination der VR-Brille mit speziellen Sensoren geschehen, welche die einzelnen Knochen der Hand erfassen und diese dann in der VR-Umgebung animiert darstellen können. Die hat den Vorteil, dass der User die exakten Bewegungen seiner eigenen Hände in der VR-Welt sehen kann.

In [Abbildung 2.16](#) sind die gängigen Arten der Interaktion mit HMDs im Augmented Reality Bereich dargestellt. [Abbildung 2.16a](#) zeigt die Selektion eines virtuellen Gegenstandes indem er angesehen wird. Hierzu ist im Sichtbereich des HMD eine Markierung eingeblendet, die als Fadenkreuz dient. Zeigt diese Markierung auf das gewünschte Objekt, wird ein Signal ausgelöst und so ein Klick simuliert. Diese Technik wird „Gaze Selection“ genannt. Dabei wird wiederum eine Technik namens „Raycasting“ verwendet, bei der ein Strahl vom Fadenkreuz zum Objekt geschickt wird, um zu ermitteln, welches Objekt selektiert wurde (vgl. [Butz und Krüger, 2017](#)).

Ist das gewünschte Objekt selektiert, muss wie schon erwähnt, eine Eingabe folgen um etwas mit dem Objekt zu tun. [Abbildung 2.16b](#) zeigt eine einfache Gestenerkennung, bei der der Benutzer im Sichtfeld bzw. dem Sichtfeld der Sensoren und Kameras eine Geste ausführt, die dann durch das HMD erfasst, erkannt und interpretiert wird. Diese Geste kann dann einen einfachen Klick bedeuten oder auch direkt eine umfangreichere Manipulation auslösen.

[Abbildung 2.16c](#) nutzt die Erkennung der Sprache zur Ausführung von Befehlen. Auch hier kann eine einfache Selektion erfolgen oder ein komplexerer Befehl aufgerufen werden, welcher dann entsprechend auf das ausgewählte Objekt angewendet wird. Vorteile der Spracheingabe sind unter Anderem, dass der Benutzer beide Hände frei hat, die Erkennung einfacher ist als bei Gesten und das die grade erwähnten Gesten nicht komplett auswendig gelernt werden müssen.

Neben diesen Möglichkeiten gibt es noch diverse Hilfsmittel wie Handschuhe, die mit Sensoren und Merkmalen zur besseren Erkennung durch HMDs ausgestattet sind und Bewegungen, Gesten oder andere Signale übertragen, ohne dass sie im Blickfeld des Anwenders sein müssen. Andersherum können diese Hilfsmittel wie der Handschuh ebenfalls genutzt werden, um dem User ein haptisches Feedback zu geben und so Berührungen zu simulieren (vgl. [CSTI, 2017a](#)).

## 2.7 Lernmöglichkeiten

Seit vielen Jahren werden grade in Unternehmen die Fortbildungen durch elektronische Hilfsmittel unterstützt. Lernvideos und Web basierte Trainings sollen Mitarbeiter auf bestmögliche Art und Weise schulen und auf den jeweiligen Bedarf zugeschnitten sein. Das sogenannte „Blended Learning“ verbindet die klassischen Lernmethoden mit

den Möglichkeiten von vernetzten Systemen (vgl. [Erpenbeck u. a., 2015](#)).

Virtuelle und erweiterte Realitäten eignen sich hervorragend um Menschen in Umgebungen und Situationen zu versetzen, mit denen sie nicht alltäglich konfrontiert werden, um ihnen den Umgang und das Handling der Situation zu vermitteln. Zu diesem Zweck müssen Menschen lernen und dies geschieht am besten über stetige Wiederholungen.

Neben den klassischen Lernmethoden und -Umgebungen haben sich in der Vergangenheit immer mehr Möglichkeiten aufgetan, um mit elektronischer Unterstützung zu lernen. Gemeint sind hier Online-Kurse, Schulungen und unterstützende digitale Inhalte. In den letzten Jahren haben auch immer mehr virtuelle Lernumgebungen ihren Platz gefunden. In ihnen werden virtuelle oder erweiterte Realitäten geschaffen, die den Anwendern die Möglichkeit bieten soll, Situationen der realen Welt zu trainieren. Die bekanntesten virtuellen Lernumgebungen sind Luft- und Raumfahrt-Simulatoren oder Schiess- und Trainingssimulatoren der Bundeswehr<sup>5</sup>.

Grade in Umgebungen, in denen ein hohes Risiko besteht, wenn unerfahrene Personen



(a) Link-Trainer von 1943 (Blue Box), (b) Aktueller Flugsimulator, vgl. [Witmer](#) vgl. [Zimmerman \(1943\)](#) ([2015](#))

Abbildung 2.17: Flugsimulatoren Anfang der 1930er Jahre und Heute

geschult werden, wie eben in der Flugausbildung von Piloten, sind Simulatoren ein guter Ersatz für reale Flugstunden. Die ersten Trainingssimulatoren entstanden hierin den 1930er Jahren, damals noch ohne Computertechnik, alles wurde mechanisch

---

<sup>5</sup>Thales Group - <https://www.thalesgroup.com/de/deutschland/news/thales-sichert-einsatzfaehigkeit-mit-training-simulation-loesungen> - letzter Zugriff: 02.09.2018

gesteuert und simuliert (vgl. [Abbildung 2.17a](#)). In der heutigen Zeit haben die Simulatoren immer noch das Aussehen eines kompletten Cockpits um das Training sehr realitätsnah zu gestalten. Aber die Technik dahinter ermöglicht es, eine Simulation ablaufen zu lassen, die auf jede Handlung des Lernenden entsprechend reagiert (vgl. [Abbildung 2.17b](#)).

Ein anderer Ansatz für eine Mixed Reality Umgebung ist das so genannte „TurkDeck“, bei dem die virtuelle Welt durch reale Elemente ergänzt wird. Das Besondere dabei ist, dass die realen Elemente von Personen an die entsprechende Stelle gebracht werden, sobald die Person in der virtuellen Welt an der korrespondierenden Stelle angekommen ist. Der Aufbau des realen Raum wird also ständig verändert. [Abbildung 2.18](#) zeigt in Bild (a) die virtuelle Umgebung, die der Anwender durch das HMD sieht und in der er sich bewegt. Bild (b) zeigt den entsprechenden kompletten Aufbau in der realen Welt. In Bild (c) ist zu erkennen, dass der Raum eigentlich so gut wie leer ist und nur die Stelle, an der sich die Person in der virtuellen Umgebung befindet, wurde von den Helfern aufgebaut. [Abbildung \(d\)](#) veranschaulicht, dass die Bauteile immer weiter verwendet werden können, nachdem die Person sie passiert hat. Der Raum wird also vor der Person auf und hinter ihr wieder abgebaut. Der Vorteil ist ganz klar: Die Person in der virtuellen Welt kann trotzdem noch fühlen und hat nicht den Eindruck, dass das was zu sehen ist nicht existiert. Die Nachteile sind allerdings ebenso eindeutig: Es werden viele Helfer benötigt, der Auf- und Umbau muss schneller funktionieren als sich die Person in der virtuellen Welt fortbewegt und je komplexer die Umgebungen werden, desto schwieriger ist der Nachbau.

Das Training von extremen und gefährlichen Situationen lässt sich so gefahrlos



Abbildung 2.18: TurkDeck: Physical Virtual Reality Based on People (vgl. [Cheng u. a., 2015](#))

trainieren, bis die richtigen Reaktionen in sensomotorische Fähigkeiten übergegangen sind. Dies bedeutet, dass der menschliche Körper die bewusste Steuerung einer Hand-

lung soweit verinnerlicht hat, dass der Mensch nicht mehr darüber nachdenken muss. Das Ziel solcher Lerneinheiten ist das Training des prozeduralen Gedächtnisses. Hier werden kognitive wie motorische Fähigkeiten gespeichert, die nach genügend Training nur noch abgerufen werden, ohne lange darüber nachdenken zu müssen. Dazu werden Abläufe, Situationen und Handlungen immer wieder durchgeführt.

Die Wiederholung gefährlicher Situationen sollte möglichst ungefährlich und kontrolliert ablaufen, um niemanden zu gefährden. Auch Abläufe zu Wartungszwecken oder zur Überprüfung von Geräten sind oftmals immer gleich und können somit gut im prozeduralen Gedächtnis gespeichert werden. Problem hierbei ist, dass sich viele Situationen, in denen das schnelle Handeln erforderlich ist, nicht ohne weiteres nachstellen lassen. Ein gutes Beispiel sind hier Luft- und Raumfahrtsimulatoren, in denen die Piloten auf Extremsituationen vorbereitet werden, indem sie ihnen immer wieder ausgesetzt sind. Solche Lernumgebungen erfordern einen umfangreichen Aufbau und eine komplexe Programmierung, da in der Regel Cockpits nachgebaut und verkabelt werden und nur der Blick aus den Fenstern virtuell dargestellt wird. Hier würden HMDs einen großen Vorteil bringen und die Einrichtung sehr erleichtern. Trotzdem würde in den genannten Fällen eher Mixed Reality zum Einsatz kommen, da viele Instrumente tatsächlich mechanisch bedient werden müssen um den echten Lerneffekt hervor zu rufen.

Das Beispiel einer industriellen Anlage wie der Gondel einer Windkraftanlage lässt eher einen Einsatz von VR-Techniken zu. Weitere Informationen zum Einsatz von Virtual-Reality Techniken in Lernumgebungen finden sich in der Masterarbeit von [Bronsch \(2018\)](#).

## 2.8 Fazit

Durch den ständigen technologischen Fortschritt sind sowohl Industrie 4.0 als auch VR/AR-Anwendungen immer weiter verbreitet. Gerade in Industrieanlagen ist die Automatisierung, Steuerung und Überwachung durch Computer ein immenser Schritt in Richtung Digitalisierung. Die Cyber-Physical Systems, die durch die Vernetzung von Systemen sowohl in der Produktion und Fertigung als auch zwischen Zulieferern und Kunden entstehen, lassen immer genauere und pünktlichere Bestellungen zu und die

Prozesse werden weiter optimiert. Computer sind allgegenwärtig und machen einfache physische Gegenstände in der digitalen Welt präsent, so dass diese ihren Status bekannt machen und teilweise auch auf Eingaben reagieren können.

Diese Allgegenwärtigkeit und die Digitalisierung von Gegenständen machen es möglich virtuelle oder erweiterte Realitäten zu schaffen, die mit der realen Welt immer enger verbunden sind. Durch Vermischen von virtueller und realer Welt lassen sich Mixed Reality Umgebungen schaffen, die für den Nutzer immer immersiver werden und so das Gefühl vermitteln, sich tatsächlich in der Welt zu befinden, die im Display dargestellt wird. Durch Augmented Reality können reale Umgebungen um Informationen und Möglichkeiten zur Interaktion mit Gegenständen erweitert werden um den Anwender zu unterstützen oder Informationen ortsgebunden anzuzeigen.

Spielen all diese Faktoren zusammen, lassen sich realitätsnahe Simulationen erstellen, die den Anwendern die Möglichkeit bieten in virtuellen Umgebungen reale Szenarien nachzustellen und zu üben. In vielen Fällen bieten sich hierzu Mixed Reality Anwendungen an, da auch reale Elemente zum Training notwendig sind, damit sich das Gelernte besser im prozeduralen Gedächtnis festsetzt. Ebenso lassen sich Handgriffe durch virtuelles Training oder der Unterstützung durch erweiterte Realität trainieren und optimieren, um in Wartungsarbeiten weniger Zeit zu benötigen und den Ausfall von Maschinen zu verkürzen.

## **3 Entwurf**

### **3.1 Einleitung**

In diesem Kapitel werden die entscheidenden Aspekte dargestellt, die relevanten Einfluss auf die Entwicklung des Prototypen haben. Es werden unterschiedliche Szenarien betrachtet, welche sich in unterschiedlichen Bereichen und verschiedenen Anwendungen befinden. Hierzu sollen die Anforderungen an die AR- oder VR-Umgebung beleuchtet werden.

Die Administration von industriellen Anlagen beinhaltet sowohl die Einrichtung, als auch die Wartung und die Fehlerbehebung in besagten Anlagen. Um solche großen und komplexen Anlagen zu administrieren muss der Techniker vor Ort detaillierte Anleitungen bekommen und wissen, welches System wo zu finden und wie zu reparieren ist.

Ebenso ist der Einsatz in Wartung und Kontrolle von Fahr- oder Flugzeugen denkbar. Diese Wartung muss meist schnell durchgeführt werden und die Systeme sind kleiner, komplexer und schwerer zu erreichen als in großen industriellen Anlagen.

### **3.2 Szenario 01: Wartungsarbeiten von Windkraftanlagen**

#### **3.2.1 Einleitung**

Das erste Szenario zielt hier auf die Wartung einer Windkraftanlage ab. Diese Anlagen sind so groß, dass sie von einem Techniker betreten werden können um die einzelnen Systeme oder Komponenten zu warten. In den folgenden Abschnitten werden nun

Bereiche und Systeme ermittelt, die sich mit Hilfe von AR-Unterstützung einfacher administrieren lassen.

#### 3.2.2 Analyse

Der Aufbau einer Gondel für Windkraftanlagen ist grob gesehen nicht sehr komplex, es gibt den Rotor, das Getriebe und den Generator. Diese großen Baugruppen sind eher selten defekt, da sie recht einfach und sehr massiv aufgebaut sind. Trotzdem müssen sie zwei mal jährlich überprüft und gewartet werden. Wartungsaufwändiger sind Baugruppen wie Elektrik, Elektronik, Sensorik oder die Hydraulikanlage, da diese wesentlich störanfälliger sind, aber sie sind auch einfacher zu reparieren. Im ersten Betriebsjahr liegen die Kosten für die Instandhaltung bei ca. 0,3% der Kosten für die Anlage und wachsen jährlich um 0,3%. So werden über ein Viertel der Kosten in 20 Jahren Betrieb für Wartung und Instandhaltung ausgegeben. (vgl. [BWE - Bundesverband WindEnergie, 2018](#))

Dabei beinhalten die Reparaturkosten die Häufigkeit des Schadens, die Ausfallzeit, die Bauteilkosten und die Montagekosten. Um die Ausfallzeit und die Montagekosten möglichst gering zu halten, müssen bei den Technikern alle Handgriffe perfekt sitzen. Wie in [Abbildung 3.1](#) dargestellt, nehmen die großen mechanischen Teile in den

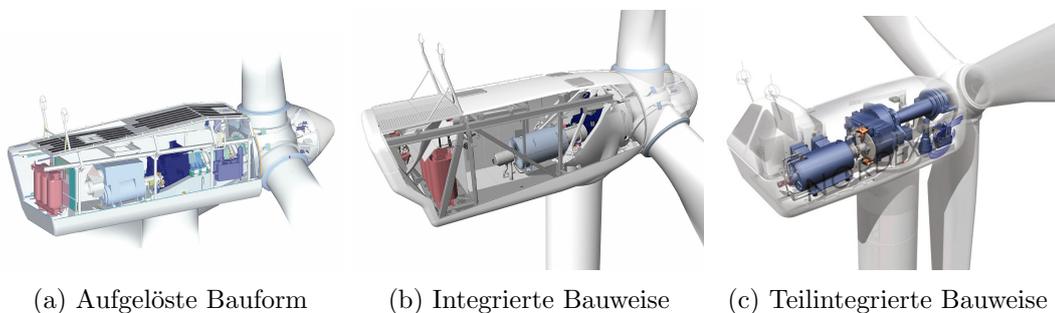


Abbildung 3.1: Verschiedene Bauarten von Windkraftanlagen (vgl. [BWE - Bundesverband WindEnergie, 2018](#))

verschiedenen Bauweisen den Großteil der Gondel ein. Die aufgelöste Bauform benutzt zwei separate Lager und ein frei zugängliches Getriebe, bei der teilintegrierten Bauweise wird ein Teil der Lagerung in das Getriebe verlagert und über das Getriebegehäuse abgestützt, bei der integrierten Bauweise gibt es keine freien Teile mehr und alles ist im

Getriebe oder der Rotor-Generator-Einheit integriert. Die elektronischen Baugruppen befinden sich meist im hinteren Teil der Anlage. Hier zu finden sind Schaltschränke, Sicherungen und Steuerungselektronik. Außen an der Gondel befinden sich Windsensoren, über die festgestellt wird, ob der Wind zu stark wird und der Rotor angehalten werden muss um die Anlage nicht zu beschädigen. Hierzu wird in den meisten Anlagen die Stellung der Rotorblätter verändert, die Bremsscheibe ist überwiegend nur noch als Feststellbremse installiert, nicht zum Anhalten des Rotors.

Taucht nun in einer Anlage ein Fehler auf, stellen sich zunächst die folgenden Fragen:

- „Was ist defekt?“
- „Wo befindet sich das defekte Teil?“
- „Wer darf es reparieren?“
- „Welche Voraussetzungen müssen für eine Reparatur oder einen Austausch gegeben sein?“

Da es bei Windkraftanlagen unterschiedliche Modelle und Hersteller gibt, weiß ein Techniker zwar, wie eine Wartung oder Reparatur durchzuführen ist, kennt sich aber meist nicht in jedem Modell gut aus. Steht nun ein Wartungseinsatz an, lassen sich die Techniker mit Hilfe einer VR-Simulation des entsprechenden Modells kurz vor dem Einsatz so vorbereiten, dass sie während der Wartung eine bessere und schnellere Orientierung haben. Wichtige Messpunkte können eingeblendet oder das Innere von Schränken und Baugruppen angezeigt werden.

#### 3.2.3 Aufbau

Zunächst wird der Aufbau der VR-Umgebung zu Schulungs- oder Einweisungszwecken beschrieben. Dieser baut auf der VR-Simulation einer Windkraftanlage von Johann Bronsch auf (vgl. [Bronsch, 2018](#)). Diese Umgebung wurde für die Lernmodelle „Lernen an Beispielen“ und „Begleitetes Lernen“ entwickelt. Hier lassen sich in einer sicheren Umgebung viele Komponenten und Eigenschaften einer Windkraftanlage simulieren. Wie in [Abbildung 3.2](#) zu sehen, ist hier ein Modell aus einer CAD-Zeichnung entstanden, welches sehr viele Details und Komponenten enthält um die Gondel möglichst

### 3 Entwurf

detailgetreu nachzubilden. Die in dieser Simulation vorhandenen Komponenten wie

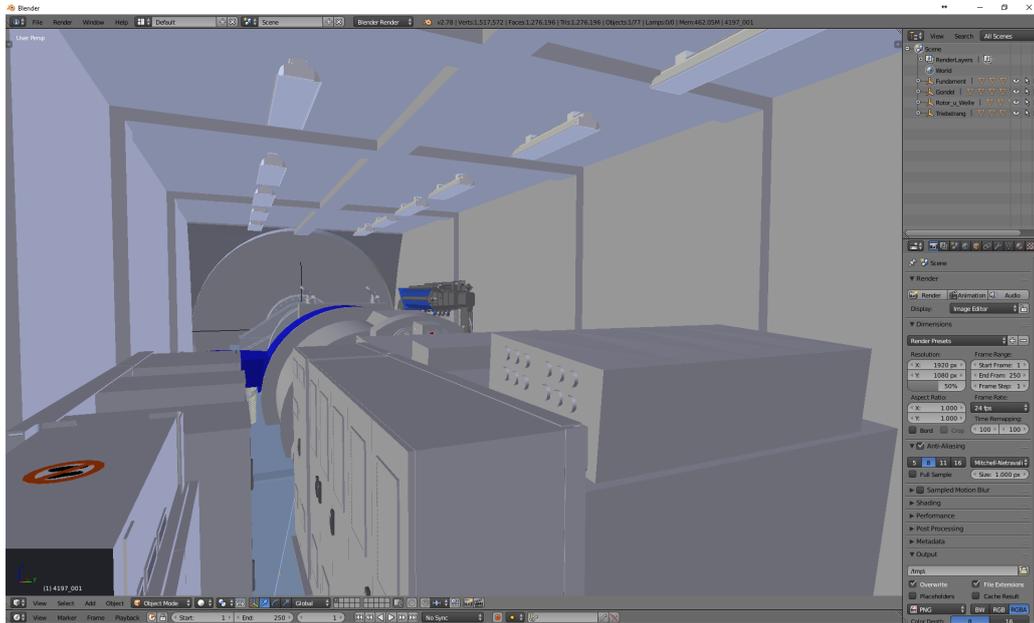


Abbildung 3.2: VR-Simulation des Inneren der Gondel einer Windkraftanlage [Bronsch \(2018\)](#)

Schaltschränke, Antriebsstrang oder Bremsen werden durch eine Berührung oder einfaches Ansehen durchsichtig und lassen den User wie mit einem Röntgenblick in das Innere schauen. Gleichzeitig werden Informationen in einem Fenster eingeblendet, die bei der Schulung helfen und den Anwender unterstützen. Je nach Aufgabe des zu Schulenden können auch die zu erfüllenden Punkte eingeblendet werden und durch die Simulation führen.

Die Orientierung bekommt der die Simulation nutzende Techniker durch Detailtreue und den exakten Nachbau der Gondel. Interaktionen können mit Controllern oder durch die Erkennung der Hände durchgeführt werden. Werden noch reale Elemente mit einbezogen, indem die Simulation in einem speziell hergerichteten Raum ausgeführt wird, lassen sich die Interaktionen noch einprägsamer gestalten (vgl. [Unterabschnitt 2.5.1](#)).

## 3.3 Szenario 02: Wartung von Systemen

### 3.3.1 Einleitung

Ein weiteres Szenario ist die Wartung oder Kontrolle von Systemen z. B. in der Gondel der Windkraftanlage. Wird nun ein Techniker mit der Reparatur beauftragt, braucht dieser ebenso die Informationen vor Ort. Mit Hilfe eines AR-fähigen Gerätes, kann er sich diese Daten direkt in der Gondel an den richtigen Stellen einblenden und sich so bei der Reparatur unterstützen lassen. Auch die routinemäßigen Inspektionen können durch Einblendungen an den zu kontrollierenden Stellen vereinfacht werden. Die zulässigen Werte können eingeblendet werden und die zu überprüfenden Teile markiert sein.

### 3.3.2 Analyse

Ein wichtiger Teil der Wartung findet hier in Schaltschränken statt, welche sehr viele Teile oder Kabel beinhalten. Mit einem AR-fähigen Gerät lässt sich das innere des Schrankes schon auf die geschlossenen Türen projizieren, so dass der Techniker schon vor dem Öffnen der Tür sieht, was der Schrank beinhaltet, wo ein Fehler zu finden oder eine Überprüfung vorzunehmen ist.

Auch bei mechanischen Teilen kann der Röntgenblick angewendet werden. Beispielsweise können selbstauskunftsfähige Systeme Daten zum aktuellen Betriebsstatus einblenden. Die Laufzeit der Welle oder der Bremsen, die Drehzahl oder die Last mit welcher der Generator zuletzt gearbeitet hat können direkt abgelesen werden ohne an dem entsprechenden Teil interagieren zu müssen.

Auch wenn der Techniker gut vorbereitet zum Wartungseinsatz aufbricht, kann die Unterstützung direkt vor Ort helfen Reparaturen schneller, zielsicherer und effizienter durchzuführen. Gerade wenn nicht von vornherein bekannt ist, wo genau der Fehler liegt oder welches Bauteil defekt ist, kann ein AR-Display hilfreich sein. Die Anzeige von möglichen Fehlerquellen und wo diese zu finden sind können ebenso hilfreich sein, wie die Anzeige von Daten vor Ort, die helfen können den Fehler bis zur Quelle zurück zu verfolgen. Mechanische Bauteile sind oft sichtbar oder hörbar beschädigt, aber elektronische Bauteile lassen sich oft nicht so einfach als defekt erkennen. Auch

die fehlerhafte Aufzeichnung von Daten kann auf einen defekt hinweisen. Die schon erwähnte Selbstauskunftsfähigkeit von Systemen kann dem Techniker diese hilfreichen Informationen direkt vor Ort einblenden und so eine Unterstützung darstellen.

Ein ähnliches Konzept hat Thyssen-Krupp zur Wartung eines Fahrstuhls vorgestellt, welches in [Abbildung 3.3](#) zu sehen ist. Mit Hilfe der HoloLens wird der Techniker hier



Abbildung 3.3: Wartung eines Aufzugs mit Hilfe der HoloLens ((vgl. [Ridder, 2016](#)))

bei den Wartungsarbeiten unterstützt und kann signifikante Daten vor Ort abrufen oder sich Unterstützung holen, die durch Videoübertragung das selbe sieht, wie der Techniker. Der große Vorteil dazu ist, dass der Techniker währenddessen beide Hände frei hat, um die nötigen Schritte durchzuführen. In ersten Versuchen wurde festgestellt, dass sich auf diese Art Wartungsarbeiten etwa 4 mal schneller durchführen lassen als auf vorher (vgl. [Ridder, 2016](#)). In Verbindung mit vorausschauenden Wartungsprogrammen können Wartungen durchgeführt werden bevor es zu einem außerplanmäßigen Ausfall kommt. So auch können Wartungseinsätze geplant werden, bei denen der Techniker mehrere Dinge erledigt und ein erneuter zeitnahe Einsatz kann vermieden werden.

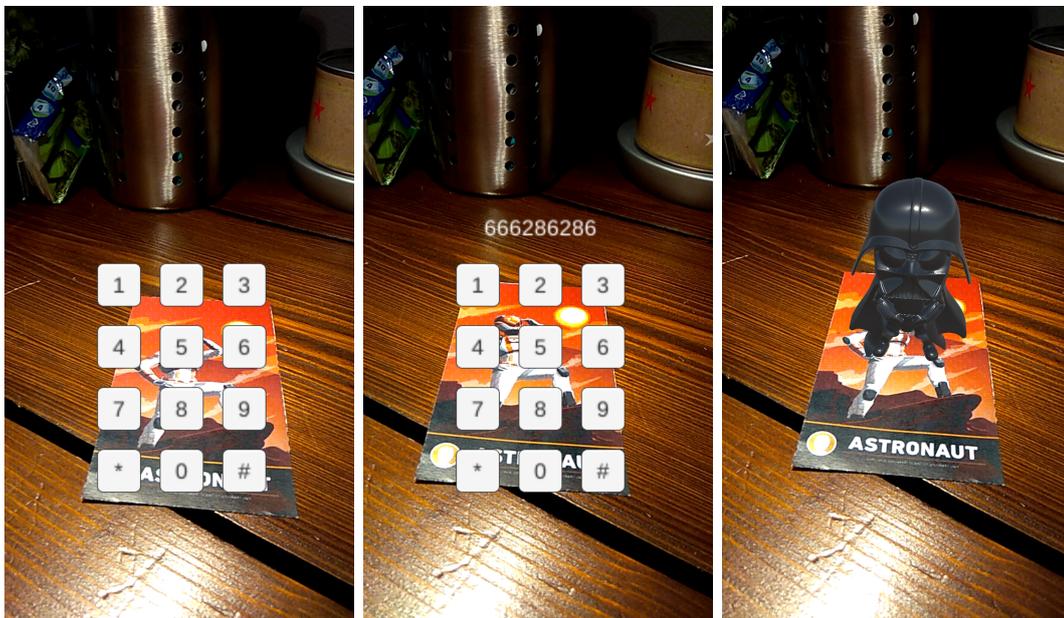
Ein weiteres Einsatzgebiet für AR-Unterstützung wäre beispielsweise die Montage oder der Aufbau von Anlagen im industriellen Bereich. Boeing testet derzeit die AR-Unterstützung bei der Erstverlegung der Kabel in Flugzeugen während der Montage und hat hier bereits eine 90-prozentige Verbesserung der Erst-Qualität und eine Zeitersparnis von etwa 30% verzeichnet. (vgl. [Boeing, 2018](#)) Ähnliche Ergebnisse können

auch in anderen Bereichen erzielt werden und bei später anstehenden Wartungen kann auf die bei der Montage genutzten Daten zurückgegriffen werden.

#### 3.3.3 Aufbau

In dieser Arbeit wird der Aufbau einer virtuellen Umgebung zu Schulungs- und Vorbereitungs-zwecken erläutert. Die Implementierung eines AR-Interfaces wird nur exemplarisch behandelt oder gegebenenfalls anhand eines VR-Beispiels erläutert, da die Umgebung in Form einer Windkraftanlagen-Gondel nicht zur Verfügung stand.

In [Abbildung 3.4](#) ist zu sehen, wie ein AR-Interface aufgebaut sein kann. Hier wurde



(a) Erkennen des Tags

(b) Eingabe des PINs

(c) Anzeige des Objekts

Abbildung 3.4: Ablauf Interaktion, Authentifizierung, Anzeige des Objekts [Waltz \(2017a\)](#)

die Vuforia-Engine<sup>1</sup> genutzt um mit Hilfe von Unity3D<sup>2</sup> einen Tag zu erkennen und darüber dann ein Interface einzublenden, welches nach erfolgreicher Eingabe eines PIN-Codes aus- und eine Figur eingeblendet wurde. Dieses Programm diente sowohl zur

<sup>1</sup>Vuforia - <https://www.vuforia.com/> - letzter Zugriff: 06.10.2018

<sup>2</sup>Unity3D - <https://unity3d.com/de> - letzter Zugriff: 06.10.2018

Veranschaulichung für die Interaktion mit AR-Interfaces als auch dazu, die Möglichkeit der Absicherung eines AR-Interfaces vor unbefugtem Zugriff darzustellen.

Beispiele für weitere Einsatzmöglichkeiten gibt es viele, an dieser Stelle sei die Montage und Wartung eines Flugzeuges genannt, um auch nicht stationäre Einrichtungen zu behandeln. Neben den komplexen Anzeigen und Kontrollen im Cockpit besteht z. B. eine Boeing 747-8 aus ca 6 Millionen Teilen und mehr als 250km Kabeln (vgl. [Görlich, 2018](#)). Des Weiteren gibt es in den Passagierbereichen diverse Komponenten wie Lüftung, Bildschirme oder Sicherheitssysteme, welche überprüft und gewartet werden müssen.

Viele Systeme sind inzwischen selbstauskunftsfähig oder könnten es sein, so dass sie direkt ihre Daten oder einen Status mitteilen können. So kann ein Techniker mit einem AR-Gerät, im besten Fall einer Brille, bei der Inspektion des Flugzeugs direkt angezeigt bekommen, welches Gerät fehlerhaft arbeitet. Mit einem „AR-Röntgenblick“

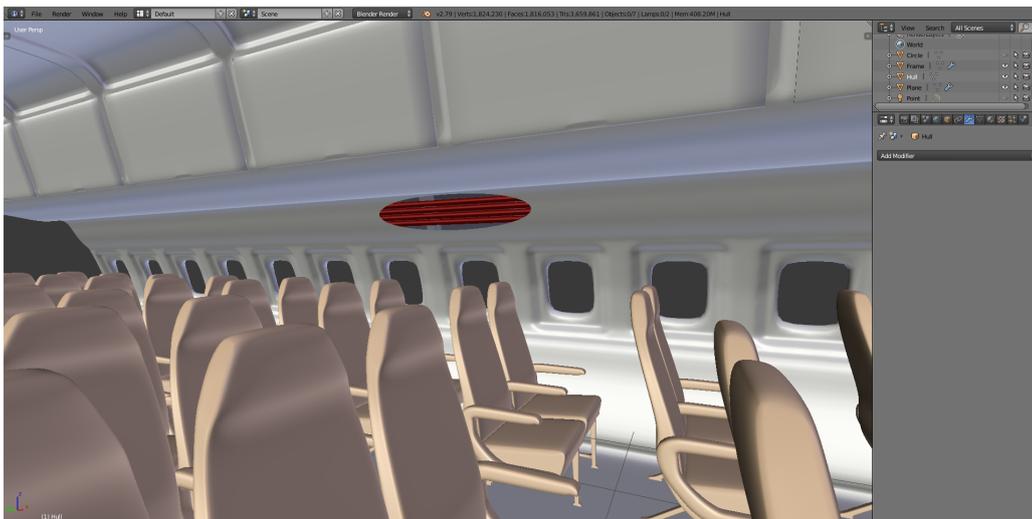


Abbildung 3.5: Röntgenblick in einer Flugzeugkabine

könnte direkt angezeigt werden hinter welcher Wand welche Systeme stecken oder wo Kabel entlanglaufen. Schematisch dargestellt in [Abbildung 3.5](#) ist zu sehen, wie ein Bild auf einer Verkleidung in der Flugzeugkabine zeigt, dass dahinter einige Leitungen verlaufen. Sind Systeme hinter Wandverkleidungen defekt, kann der Techniker sich anzeigen lassen, wie er am einfachsten an das beschädigte System heran kommt und was zum Austausch zu tun ist. Sind nur Kontrollen zu machen oder Werte abzulesen,

könnte das Entfernen der Wandverkleidung entfallen und die Werte können direkt von der Quelle abgerufen und eingeblendet werden.

Mit Hilfe der Selbstauskunft und AR-Brillen ließe sich so auch die Wartung entsprechend vereinfachen, verbessern und die Ausfallzeit von Flugzeugen reduzieren.

## 3.4 Fazit

Das Fazit dieses Kapitels soll dazu dienen, das gewählte Szenario zu begründen und darzulegen, welche Anforderungen damit verbunden sind.

Die beiden vorgestellten Szenarien, Vorbereitung auf einen Wartungseinsatz mit Hilfe von VR und Unterstützung bei der Wartung durch AR-Interfaces, sind im Grunde recht unterschiedlich, aber einige Elemente lassen sich in beiden Anwendungen nutzen. Auf Grund der nicht vorhandenen Infrastruktur einer Gondel wird der Fokus auf der VR-Anwendung liegen. Die Anwendung von Augmented Reality Interfaces wird ebenfalls behandelt, allerdings nur exemplarisch. Die QR-Code-Tags werden vorhanden sein und ein Interface einblenden, wie es in der Realität auch sein würde, nur ohne die Windkraftanlage drum herum. Diese Tags können an beliebigen Stellen angebracht werden und das Interface wird direkt über dem Tag angezeigt.

Die VR-Simulation wird ebenfalls durch Interfaces, Einblendungen und Hilfestellungen erweitert, außerdem lassen sich einzelne Elemente ein- und ausschalten oder hervorheben um die Orientierung zu vereinfachen.

# 4 Prototyp

## 4.1 Einleitung

Dieser Abschnitt der Arbeit behandelt die Erstellung des zuvor definierten Prototypen. Wie im vorangegangenen Abschnitt erwähnt, wird hauptsächlich mit der VR-Simulation gearbeitet. Das AR-Interface wird im zweiten Abschnitt des Prototypen behandelt.

Für die VR-Simulation wurden die 3D-Modelle aus dem CSTI-Projekt „*Virtuelle Offshore-Windenergieanlage*<sup>1</sup>“, zu sehen in [Abbildung 4.1](#), verwendet. Die Anpassungen wurden in Unity3D vorgenommen. An Hardware wurde eine HTC Vive, eine Microsoft HoloLens und ein Android-Smartphone verwendet.

Am Ende des Kapitels werden im Fazit die Ergebnisse reflektiert, Probleme aufgezeigt und mögliche Erweiterungen angesprochen.

## 4.2 Simulation 1: Vorbereitung auf einen Wartungseinsatz

Wie schon in [Abschnitt 3.2](#) ausgearbeitet, soll der erste Prototyp sich auf die Vorbereitung eines Wartungstechnikers auf einen Einsatz konzentrieren. Die Modelle für die VR-Simulationen wurden aus CAD-Zeichnungen übernommen, welche sich durch einen sehr hohen Detailgrad auszeichnen. Die eigentliche Verwendung dieser Modelle

---

<sup>1</sup>Virtuelle Offshore-Windenergieanlage - <https://csti.haw-hamburg.de/project/virtuelleoffshorewindenergieanlage/> - letzter Zugriff: 06.10.2018

findet sich in technischen Zeichnungen für Produktentwicklung oder zur Erstellung von Vorlagen für 3D-Drucke oder andere technische Herstellungsverfahren. Durch den hohen Detailgrad sind die Modelle nicht sonderlich gut für VR-Simulationen geeignet, da die Rechenleistung sehr hoch sein muss um solche detaillierten Modelle aus allen möglichen Blickwinkeln darzustellen. Durch die detaillierte Darstellung in der



Abbildung 4.1: Virtuelle Offshore-Windenergieanlage CSTI (2017c)

Simulation, die neben der Windkraftanlage auch Wasser, Himmel und weitere Detail-elemente enthält, kann sich ein Techniker auch schon an die Höhe einer solchen Anlage gewöhnen. Das Innere der Gondel ist, wie in [Abbildung 3.2](#) schon zu sehen, ebenfalls sehr detailliert aber weniger weitläufig.

Diese Simulation dient als Grundlage für die Vorbereitung eines Technikers und soll durch unterstützende Elemente erweitert werden, welche dem Techniker als Orientierung dienen und durch Arbeitsabläufe führen. Wie in [Abbildung 4.2](#) erkennbar, ist die Gondel selbst nicht all zu groß, enthält im hinteren Teil aber einige Schränke und auch diverse mechanische Bauteile im vorderen Bereich. In der Übersicht am linken Rand ist erkennbar, aus wie vielen einzelnen Komponenten die Simulation jetzt schon besteht. Wenn ein Techniker die Simulation nutzt um sich auf einen Einsatz vorzubereiten, ist die Gondel geschlossen und in einer reinen VR-Umgebung wie dieser gibt es

## 4 Prototyp

nicht die Möglichkeit den Techniker auf dem Helikopterlandefeld starten und die Leiter herunterklettern zu lassen. Stattdessen startet der Techniker, als wäre er soeben die Leiter herunter gestiegen, im hinteren Teil der Gondel zwischen den Schränken. Hier

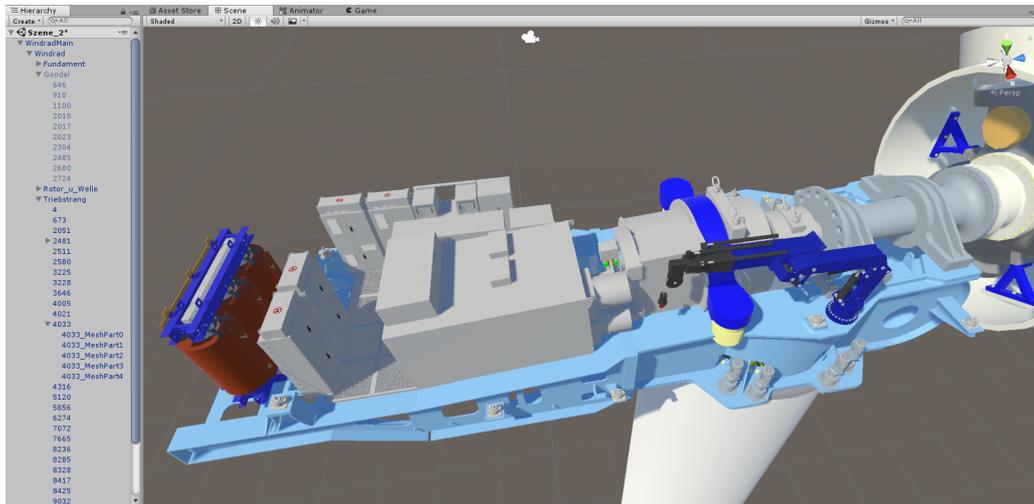
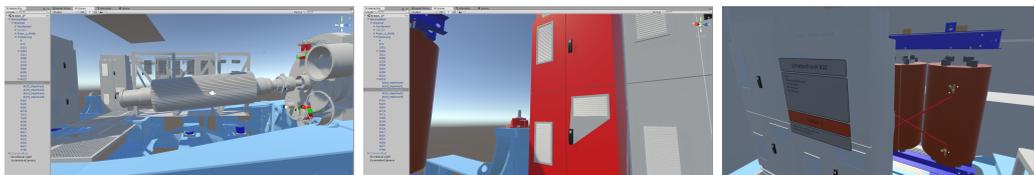


Abbildung 4.2: Übersicht der Gondel ohne Gehäuse in Unity3D

wird direkt der erste Ansatzpunkt der Simulation sein. Der Operator, der die Simulation überwacht, hat die Möglichkeit verschiedene Baugruppen oder -teile mit Labels zu versehen, die dem Techniker bei der Orientierung helfen und beschreiben, hinter welcher Tür/Klappe er welche Systeme findet. Des Weiteren ist es möglich einzelne Baugruppen farblich hervorzuheben, um den Techniker gezielt zu einem bestimmten System zu leiten und dieses Vorgehen im Gedächtnis zu verankern (vgl. [Abschnitt 2.7](#)). Lässt sich die Simulation noch weiter verfeinern, so dass selbst das Innenleben der



(a) Gehäuse des Generators (b) Schaltschrank hervorgehoben (c) Informationen auf Labels

Abbildung 4.3: Verschiedene Arten der Lernunterstützung

Schaltschränke und Gehäuse detailgetreu modelliert und eingebaut werden kann, wäre

die Möglichkeit gegeben einen Techniker bis ins kleinste Detail an die bevorstehende Aufgabe heranzuführen. Dafür müssten allerdings entsprechend detaillierte Modelle vorliegen, die wirklich jedes Detail beinhalten.

Um die Steuerung möglichst einfach zu gestalten, wurden einige Shortcuts implementiert, die es einem Operator, welcher die Simulation überwacht und steuert, ermöglichen, Baugruppen/-teile mit einem Tastendruck auszublenden oder zu färben. Ebenso werden die entsprechenden Labels ein- und ausgeblendet.

### 4.3 Simulation 2: Unterstützung bei einem Wartungseinsatz

Die zweite Simulation unterscheidet sich von der ersten dahingehend, dass es sich um eine Augmented Reality Simulation handelt und hier die Umgebung mit einbezogen ist. Es wird also keine komplette virtuelle Umgebung benötigt, wie in [Abschnitt 2.5](#) beschrieben. Die Umsetzung erfolgt, wie bei der ersten Simulation auch, in Unity3D.

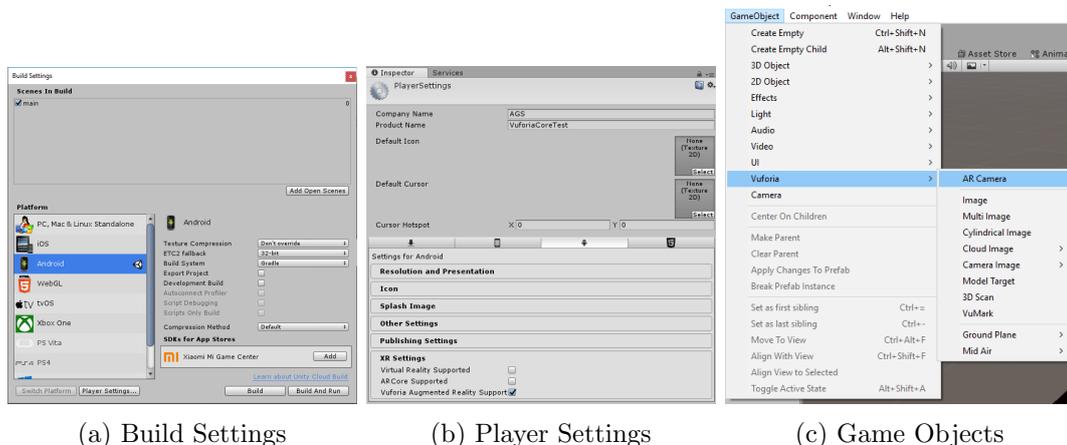


Abbildung 4.4: Einbindung von Vuforia-Engine und Objekten in Unity3D

Hier ist seit Version 2017.2 die Vuforia-Engine integriert und muss nicht nachträglich installiert werden, was die Handhabung sehr erleichtert. Um mit der Vuforia-Engine arbeiten zu können, muss diese über die Build Settings ([Abbildung 4.4a](#)) und dort in den Player Settings im Abschnitt „XR Settings“ aktiviert werden ([Abbildung 4.4b](#)).

Danach kann über das Menü ein beliebiges Vuforia-Objekt hinzugefügt werden, wie z. B. eine AR-Kamera ([Abbildung 4.4c](#)).

Die Vuforia-Engine bringt intern die komplette Mechanik mit, um Objekte oder Bilder über die Kamera eines AR-Gerätes zu erkennen. Allerdings müssen die sogenannten Targets zunächst in der eigenen Datenbank des Vuforia Developer Accounts hinzugefügt werden. Die geschieht über den Target Manager<sup>2</sup> im Vuforia Developer Portal.

Hier lassen sich verschiedene Arten von Targets erstellen, wie in [Abbildung 4.5](#) zu erkennen, ist es möglich einfache Bilder als auch geometrische Formen wie Kuben, Zylinder und komplexe 3D-Objekte zu verwenden. Für die gewählte Simulation wurde ein einfaches Bild in Form eines sogenannten Marker-Bildes gewählt. Es wäre ebenfalls möglich, anhand der CAD-Daten einzelne Geräte als 3D-Objekt zu separieren, so dass es möglich wäre, die Geräte selbst zu erkennen und keinen Marker aufdrucken zu müssen. Hierzu kann der Model Target Generator genutzt werden. Dieser kann aus CAD-Dateien Modelle extrahieren und in einen Datensatz umwandeln, der es ermöglicht mit Vuforia dieses Modell zu erkennen.

Die Bilder müssen entweder als 8bit Graustufen oder 24bit RGB Bild vorliegen, damit Vuforia sie verarbeiten kann. [Abbildung 4.6a](#) ist ein von Vuforia mitgeliefertes Target Image, das eine gute Erkennbarkeit aufweist. [Abbildung 4.6b](#) zeigt den für die Simulation erstellten QR-Code, welcher eine sehr gute Wiedererkennung ermöglicht. Das

**Add Target**

**Type:**

Single Image   Cuboid   Cylinder   3D Object

**File:**

Choose File   Browse...

jpg or .png (max file 2mb)

**Width:**

Enter the width of your target in scene units. The size of the target should be on the same scale as your augmented virtual content. Vuforia uses meters as the default unit scale. The target's height will be calculated when you upload your image.

**Name:**

Name must be unique to a database. When a target is detected in your application, this will be reported in the API.

Cancel   Add

Abbildung 4.5: Vuforia Target Manager

---

<sup>2</sup>Target Manager — Vuforia Developer Portal - <https://developer.vuforia.com/targetmanager/project/checkDeviceProjectsCreated> - letzter Zugriff: 07.10.2018



Abbildung 4.6: Target Images

das dritte Target Image ([Abbildung 4.6c](#)) ist ein generiertes Marker Image, welches eine noch bessere Erkennung gewährleistet. Ist das Bild in die Datenbank eingepflegt ist auch direkt von Vuforia die Erkennbarkeit bewertet. Der Target Manager von Vuforia ermöglicht das Anzeigen der Merkmale eines Bildes, wie in [Abbildung 4.7](#) zu sehen, enthält das Marker Image wesentlich mehr Eigenschaften die eine Erkennung möglich machen. Durch eine höhere Anzahl der erkennbaren Eigenschaften lässt sich das Bild nicht nur eindeutiger sondern auch schneller erkennen. Ist das Bild in die Datenbank eingepflegt ist auch direkt von Vuforia die Erkennbarkeit bewertet. Bei der Erkennung werden die Kontraste des Bildes oder Objektes als Erkennungsmerkmal genutzt. Am besten funktionieren also Bilder die Detail- und Kontrastreich sind und keine sich wiederholenden Muster beinhalten. QR-Codes eignen sich daher gut, auch wenn sie sehr eindeutige Züge aufweisen sind die zufälligen Muster und der Kontrast gut genug für eine problemlose Erkennung. Der Vorteil von QR-Codes ist, dass sie für Menschen leichter als etwas zu erkennen sind, das mit einem Smartphone ausgelesen werden kann. Die Marker Images sind dafür unscheinbarer und vermitteln diesen Eindruck nicht auf den ersten Blick, auch wenn sie sich technisch besser eignen würden. Sind alle Target-Images in der Datenbank hinterlegt, kann diese exportiert und in Unity3D wieder importiert werden. Ist sie dort in der Vuforia Konfiguration aktiviert, lassen sie die hinterlegten Bilder als Target Images nutzen.

Sind die Vorbereitungen getroffen und die Datenbank mit den benötigten Target

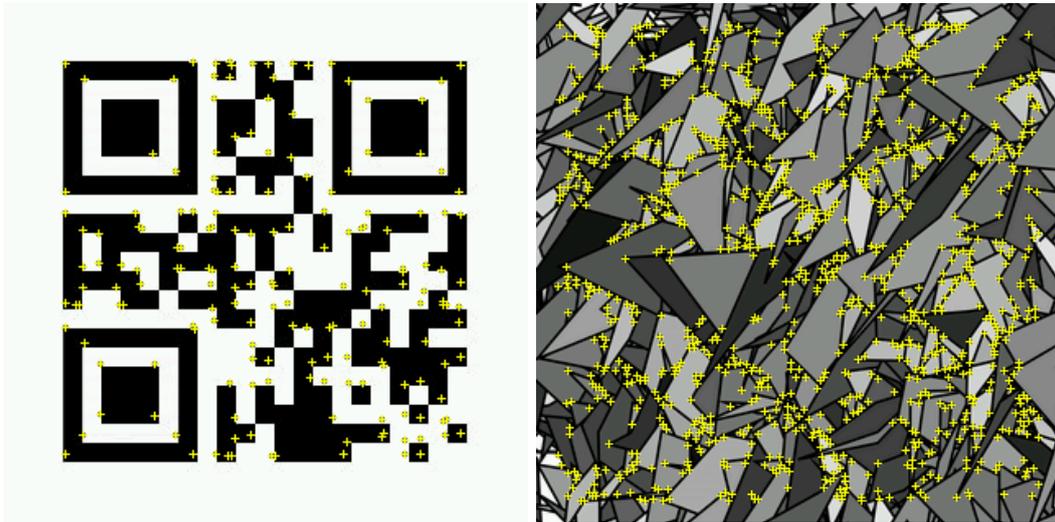


Abbildung 4.7: Features der beiden Target Images im Vergleich

Images in das Unity-Projekt importiert, wird zunächst eine AR-Kamera in die Szene eingefügt, diese ersetzt die Standard-Kamera, welche somit gelöscht werden kann. Als nächstes wird ein ImageTarget in die Szene eingefügt und im Inspector die Datenbank und das gewünschte Bild ausgewählt. Sämtliche von diesem Bild abhängende Objekte werden als Children eingefügt.

Diese Children sind in dieser Simulation die anzuzeigenden Interface-Elemente. Vier Labels samt Text wurden dem ImageTarget untergeordnet, welche angezeigt werden, sobald der QR-Code erkannt wurde. Wie in [Abbildung 4.8](#) zu sehen, werden die Interface-Elemente immer frontal und mittig auf dem Smartphone angezeigt solange der QR-Code im Bild ist. Dies wurde so gewählt, damit der Anwender nicht erst den richtigen Blickwinkel finden muss um die Anzeige zu lesen. Objekte lassen sich auch direkt auf dem Bild positionieren, wie [Abbildung 3.4c](#) schon zeigte. In diesem Fall wäre das Objekt fest mit der Ausrichtung des Bildes verbunden und kann aus jedem Blickwinkel betrachtet werden, was nur bei 3D-Objekten sinnvoll ist.

Die Möglichkeit 3D Objekte auf dem Marker darzustellen macht in der Gondel einer Windkraftanlage an einigen Stellen Sinn. Der Techniker kann sich so Modelle anzeigen lassen die repariert werden müssen, Explosionszeichnungen wären denkbar oder die Darstellung des Inneren eines Schrankes ähnlich wie mit einem Röntgenblick.

Einen *DefaultTrackableEventHandler* bekommen die Objekte beim Einfügen direkt

eingetragen, dieser beinhaltet die wichtigsten Funktionen und reicht aus um ein Objekt beim erkennen eines Target Images einzublenden.

Abbildung 4.8 zeigt das für diese Simulation exemplarische Ergebnis, ein Interface mit Informationen, welches nur angezeigt wird, wenn das Target Image, in diesem Fall der QR-Code, erkannt wird.

Die Anzeigen können mit statischen Informationen gefüllt werden, dies reicht aus um generelle Daten anzuzeigen, sollen aber aktuelle oder sogar Echtzeitdaten in dem Interface stehen, müssen diese Daten von den Systemen selbst bereitgestellt und gesammelt werden. Wie in Abschnitt 2.2 erwähnt, sind immer mehr Systeme selbstauskunftsfähig und in der Lage ihren Status in der virtuellen Welt bekannt zu machen, somit wäre dies ein denkbarer Anwendungsfall.



Abbildung 4.8: Interface Einblendung bei erkanntem QR-Code

### 4.4 Fazit

Die Entwicklung der Prototypen baute zum Einen auf der vorliegenden VR-Simulation einer Windkraftanlage von Johann Bronsch auf und so konnte auf den Erkenntnissen aus Bronsch (2018) aufgebaut werden. Die Erweiterung der Simulation um Funktionen

und Elemente zur Lernunterstützung wurde mit gängigen Werkzeugen und Programmen durchgeführt.

Zum Anderen wurde die zweite Simulation auf den Erkenntnissen aus [Waltz \(2017a\)](#) aufgebaut. Die Anwendung lässt sich sowohl auf einem Smartphone als auch auf der Microsoft HoloLens starten und nutzen.

Beide Prototypen lassen sich in Umfang und Funktion jederzeit erweitern und sind in dieser Arbeit relativ allgemein gehalten. Da die virtuelle Umgebung einer Windkraftanlage schon vorhanden war, wurde diese erweitert und mit Hilfsmitteln für die Vorbereitung auf einen Wartungseinsatz angereichert. Ein Techniker soll hier durch einen Operator, der die Simulation von außen steuert, angeleitet werden. Um die Abläufe möglichst gut zu lernen und in sensomotorische Fähigkeiten umzuwandeln, muss eine Situation immer und immer wieder durchlaufen werden. Um hierbei nicht abgelenkt zu werden und die direkten Wege zum Ziel zu nehmen, können dem Techniker entsprechende Hinweise eingeblendet, Abdeckungen entfernt oder Teile farblich hervorgehoben werden. Dadurch soll gewährleistet sein, dass die Abläufe möglichst linear durchlaufen werden. Durch eine einfache Steuerung kann ein Operator schnell und gezielt Baugruppen/-teile manipulieren oder Hinweise einblenden.

Die zweite Simulation wurde exemplarisch aber von Grund auf neu erstellt. Hier wurde zunächst eine AR-Anwendung implementiert, die entsprechend vorbereitete Bilder erkennt und ein Interface einblendet, welches einem Techniker vor Ort Informationen zu den Systemen liefert, die er abfragen möchte. Diese Anwendung wurde in Unity3D mit Hilfe der Vuforia Engine entwickelt, die darauf ausgelegt ist, Bilder, Formen und sogar Gegenstände zu erkennen und darauf zu reagieren.

Die Umsetzung erfolgte mit verschiedenen Target-Images, unter Anderem mit einem Beispielbild von Vuforia, dann mit verschiedenen QR-Codes und abschließend mit einigen generierten Marker-Images, die einen besonders hohen Erkennungsfaktor haben sollen. Auf Grund des Wiedererkennungsfaktors wurde die Simulation dann mit einem QR-Code durchgeführt. Sowohl bei Tageslicht, als auch bei künstlichem und sehr geringem Licht funktionierte die Erkennung einwandfrei. Die Implementierung der beiden Simulationen erfolgte zunächst als Prototyp um den Nutzen einiger Funktionen von Virtual Reality und Augmented Reality im Industrie 4.0 Bereich zu veranschaulichen und zu testen. Insbesondere die Versuche im AR-Bereich waren sehr positiv, die Genauigkeit, Geschwindigkeit und Zuverlässigkeit der Erkennung waren zu keinem

Zeitpunkt ein Problem und Funktionierten auch unter verschiedenen und schwierigeren Bedingungen problemlos.

Im VR-Bereich musste wenig aufgebaut werden, da die Simulation der Windkraftanlage schon zur Verfügung stand. Die Anpassungen verliefen auch hier problemlos, da überwiegend Standardfunktionen genutzt werden konnten. In dieser Simulation stand die Orientierung und Zielfindung im Vordergrund, welche durch einen Operator angeleitet wird, der die Simulation von Außen überwacht.

# 5 Fazit

## 5.1 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine VR-Simulation und eine AR-Anwendung entworfen. Diese sollen dabei helfen Menschen im Industrie 4.0 Umfeld arbeiten einfacher, schneller und sicherer auszuführen. Um dies zu gewährleisten, wurde zunächst in [Kapitel 2](#) analysiert, welche Eigenschaften Cyber-Physical Systems und Ubiquitous Computing mit sich bringen. Anschließend wurden die Spezifikationen von Industrie 4.0 beleuchtet um auch diese in den Simulationen zu berücksichtigen. Virtuelle Realitäten und die Interaktionsmöglichkeiten mit diesen wurden im Anschluss analysiert. Dabei standen sowohl die Funktionsweise der verschiedenen Arten von virtuellen Realitäten als auch ihre Besonderheiten im Fokus. Den Abschluss der Analyse bildeten die Lernmöglichkeiten, welche durch VR und AR ermöglicht werden.

Aus den Ergebnissen der Analyse entstanden dann zwei Szenarien in [Kapitel 3](#), in denen verdeutlicht werden sollte, in welcher Form virtuelle und erweiterte Realität in Industrie 4.0 unterstützend eingesetzt werden kann. Daraus ergaben sich Anforderungen, die von der Simulation und der Anwendung erfüllt werden mussten. Diese wurden anschließend im [Kapitel 4](#) umgesetzt und getestet.

Die Erstellung der Prototypen erfolgte in Unity3D. Bei der VR-Umsetzung wurde auf die vorhandene Simulation einer Windkraftanlage zurückgegriffen. Diese wurde um Funktionen und Anzeigen erweitert um eine Vorbereitung auf einen Wartungseinsatz durchzuführen. Hierbei soll der Techniker möglichst effizient geschult werden, damit die Wartung schnell und sicher durchgeführt wird.

Für die AR-Anwendung wurde zusätzlich die Vuforia-Engine in Unity3D verwendet. Diese ermöglichte die Erkennung von Bildern in Form von QR-Codes. Wenn der entsprechende Code entdeckt wurde, hat sich ein Interface mit Informationen eingeblendet. Ein Techniker kann so Daten direkt vor Ort abrufen und nutzen.

Die Möglichkeiten zur Nutzung von VR und AR-Techniken im Industrie 4.0 Umfeld wurden in dieser Arbeit dargelegt und die Umsetzung der nötigen Simulation und Anwendung anhand der Prototypen bewiesen.

## 5.2 Ausblick

Die Ergebnisse dieser Arbeit stehen Studenten für zukünftige Projekte zur Verfügung. Hierbei sind diverse, breit gefächerte Weiterentwicklungen denkbar. Eine Weiterführung der virtuellen Umgebung zu Aus- und Weiterbildungszwecken wäre denkbar. An dieser Stelle könnten Tests durchgeführt werden um festzustellen, welche Mechanismen dem Lernen in einer industriellen Umgebung am besten helfen. Hierzu können vergleichende Versuche mit Probanden durchgeführt werden, bei denen Vergleichswerte für die Nutzung von VR/AR-Techniken und ohne diese Technologien genommen werden.

Eine mögliche Weiterentwicklung der VR-Simulation kann andere Szenarien beinhalten. Wie in dieser Arbeit beschrieben, wären High-Risk Umgebungen sehr gut geeignet. Es könnten Szenarien erstellt werden, die einen Techniker vor bestimmte komplexe Aufgaben stellt, wenn möglich können hier historische Daten miteinbezogen werden.

Im Augmented Reality Bereich wäre eine Verbindung zu einem System denkbar, welches Echtzeit-Daten liefert, die abgerufen werden können. Hier wäre eine Verknüpfung zu BigData-Themen denkbar. Auch hier lassen sie sich Anwendungsgebiete auf andere Industrieanlagen erweitern. Zusätzlich kann noch ein Sicherheitskonzept eingebaut werden, damit nur autorisierte Personen Zugriff auf die Daten haben (vgl. [Waltz, 2017a](#)). Außerdem können auf der Grundlage dieser Arbeit weitere unterstützende Systeme entworfen werden, die Wartungen oder Installationsarbeiten

erleichtern. Wie in [Abschnitt 2.2](#) erwähnt, entwickeln sich neben der Industrie noch in weiteren Bereichen große Cyber-Physical Systems. Hier werden diverse Ansatzpunkte für unterstützende Systeme auftauchen.

Virtual und Augmented Reality haben sehr großes Potential und mit leistungsfähigerer Hardware und besserem Energiemanagement lassen sich immer größere und detailliertere Simulationen erstellen. Dadurch können die Umgebungen zur Schulung von Mitarbeitern wesentlich realitätsnaher gestaltet werden und so die Ergebnisse der Simulation verbessern. Auch im AR-Bereich kann der technische Fortschritt einige Verbesserungen bringen. Auch hier ist die Akkulaufzeit ein Problem, ebenso wie die Größe der Displays. Das Potential für Weiterentwicklungen wird mit verbesserter Hardware weiter steigen.

# Literaturverzeichnis

- [Aaron u. a. 2017] AARON, Paul ; ZELLER, Mett ; WOJCIAKOWSKI, Matt: *Inside-out tracking*. 2017. – URL <https://docs.microsoft.com/en-us/windows/mixed-reality/enthusiast-guide/tracking-system>. – Zugriffsdatum: 30.09.2018
- [acatech 2011] ACATECH (Hrsg.): *Cyber-Physical Systems — Merging the Physical and Virtual Worlds*. S. 15–21. In: ACATECH (Hrsg.): *Cyber-Physical Systems: Driving force for innovation in mobility, health, energy and production*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2011. – URL [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-29090-9\\_4](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-29090-9_4). – ISBN 978-3-642-29090-9
- [Ashton 2009] ASHTON, Kevin: *That 'Internet of Things' Thing*. 2009. – URL <http://www.rfidjournal.com/articles/view?4986>. – Zugriffsdatum: 30.04.2018
- [Azuma 1997] AZUMA, Ronald T.: A Survey of Augmented Reality. In: *Presence: Teleoper. Virtual Environ.* 6 (1997), August, Nr. 4, S. 355–385. – URL <http://dx.doi.org/10.1162/pres.1997.6.4.355>. – ISSN 1054-7460
- [Boeing 2018] BOEING: *Boeing Tests Augmented Reality in the Factory*. 2018. – URL <http://www.boeing.com/features/2018/01/augmented-reality-01-18.page>. – Zugriffsdatum: 05.03.2018
- [Broll 2013] BROLL, Wolfgang: *Augmentierte Realität*. S. 241–294. In: DÖRNER, Ralf (Hrsg.) ; BROLL, Wolfgang (Hrsg.) ; GRIMM, Paul (Hrsg.) ; JUNG, Bernhard (Hrsg.): *Virtual und Augmented Reality (VR / AR): Grundlagen und Methoden der Virtuellen und Augmentierten Realität*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2013. – URL [https://doi.org/10.1007/978-3-642-28903-3\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-642-28903-3_8). – ISBN 978-3-642-28903-3

- [Bronsch 2018] BRONSCH, Johann: *Einsatz von Virtual-Reality Techniken in Lernumgebungen*. 2018. – URL <http://users.informatik.haw-hamburg.de/~ubicomp/arbeiten/master/bronsch.pdf>. – Zugriffsdatum: 04.04.2018
- [Broy 2010] BROY, Manfred (Hrsg.): *Einleitung*. S. 13–15. In: BROY, Manfred (Hrsg.): *Cyber-Physical Systems: Innovation Durch Software-Intensive Eingebettete Systeme*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2010. – URL [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-14901-6\\_1](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-14901-6_1). – ISBN 978-3-642-14901-6
- [Brynjolfsson u. a. 2011] BRYNJOLFSSON, Erik ; HITT, Lorin M. ; KIM, Heekyung H.: *Strength in Numbers: How Does Data-Driven Decisionmaking Affect Firm Performance?* April 2011. – URL <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.1819486>. – Zugriffsdatum: 21.05.2018
- [Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2018] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE: *Plattform Industrie 4.0*. 2018. – URL <https://www.plattform-i40.de/I40/Navigation/DE/Industrie40/WasIndustrie40/was-ist-industrie-40.html>. – Zugriffsdatum: 20.05.2018
- [Burdea und Coiffet 2003] BURDEA, G. C. ; COIFFET, P.: *Virtual Reality Technology*. Hoboken, New Jersey : John Wiley and Sons Inc., 2003. – 2nd Edition
- [Butz und Krüger 2017] BUTZ, A. ; KRÜGER, A.: *Mensch-Maschine-Interaktion*. 2. Auflage. Walter de Gruyter GmbH, 2017 (De Gruyter Studium Series). – ISBN 9783110476453
- [BWE - Bundesverband WindEnergie 2018] BWE - BUNDESVERBAND WINDENERGIE: *Wartung und Instandhaltung*. 2018. – URL <https://www.wind-energie.de/infocenter/technik/betrieb/wartung-und-instandhaltung>. – Zugriffsdatum: 05.03.2018
- [Cheng u. a. 2015] CHENG, Lung-Pan ; ROUMEN, Thijs ; RANTZSCH, Hannes ; KÖHLER, Sven ; SCHMIDT, Patrick ; KOVACS, Robert ; JASPER, Johannes ; KEMPER, Jonas ; BAUDISCH, Patrick: *TurkDeck: Physical Virtual Reality Based on People*. In: *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology*. New York, NY, USA : ACM, 2015 (UIST '15), S. 417–426.

- URL <http://doi.acm.org/10.1145/2807442.2807463>. – ISBN 978-1-4503-3779-3
- [CSTI 2017a] CSTI: *Force-Feedback-Handschuh für Virtual Reality Anwendungen*. 2017. – URL <https://csti.haw-hamburg.de/project/force-feedback-handschuh-fuer-virtual-reality-anwendungen/>. – Zugriffsdatum: 02.09.2018
- [CSTI 2017b] CSTI: *Eine kontext-sensitive Tasse für die vernetzte Zukunft*. 2017. – URL <https://csti.haw-hamburg.de/project/eine-kontext-sensitive-tasse-fuer-die-vernetzte-zukunft/>. – Zugriffsdatum: 30.04.2018
- [CSTI 2017c] CSTI: *Virtuelle Offshore-Windenergieanlage*. 2017. – URL <https://csti.haw-hamburg.de/project/virtuelleoffshorewindenergieanlage/>. – Zugriffsdatum: 07.10.2018
- [(DeSF) 2006] (DeSF), Deutsche S.: *Holodeck*. 2006. – URL [http://www.desf.de/images/Holodeck\\_6.gif](http://www.desf.de/images/Holodeck_6.gif). – Zugriffsdatum: 02.07.2017
- [Dörner u. a. 2013] DÖRNER, Ralf ; BROLL, Wolfgang ; GRIMM, Paul ; JUNG, Bernhard: *Virtual und Augmented Reality (VR / AR)*. 1. Springer Vieweg, 2013. – ISBN 978-3-642-28902-6
- [Erpenbeck u. a. 2015] ERPENBECK, John ; SAUTER, Simon ; SAUTER, Werner: *E-Learning und Blended Learning*. Springer-Verlag, 2015
- [Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS 2014] FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR INTEGRIERTE SCHALTUNGEN IIS: *Cyber-Physical Systems@Fraunhofer IIS*. 2014. – URL [https://www.iis.fraunhofer.de/content/dam/iis/de/doc/lv/CPS\\_NOP\\_Broschuere.pdf](https://www.iis.fraunhofer.de/content/dam/iis/de/doc/lv/CPS_NOP_Broschuere.pdf). – Zugriffsdatum: 05.04.2018
- [Go2Android 2016] GO2ANDROID: *HTC Vive pre-setup*. 2016. – URL [https://www.go2android.de/wp-content/uploads/2016/02/htc-vive-pre-setup-160207\\_2\\_4.jpg](https://www.go2android.de/wp-content/uploads/2016/02/htc-vive-pre-setup-160207_2_4.jpg). – Zugriffsdatum: 04.06.2018
- [Görlich 2018] GÖRLICH, Jens: *Windrad Querschnitt*. 2018. – URL <http://magazin.lufthansa.com/xx/de/flotte/boeing-747-8/sechs-millionen-teile-ein-jumbo/>. – Zugriffsdatum: 05.03.2018

- [Heilig 1962] HEILIG, Morton: *Sensorama*. 1962. – URL <https://en.wikipedia.org/wiki/Sensorama>. – Zugriffsdatum: 21.06.2018
- [Hilton 2013] HILTON, Steve: *IoT and predictive maintenance*. 2013. – URL <https://blog.bosch-si.com/industry40/iot-predictive-maintenance/>. – Zugriffsdatum: 31.05.2018
- [Hirsch-Kreinsen u. a. 2018] HIRSCH-KREINSEN, Hartmut ; ITTERMANN, Peter ; NIEHAUS, M.Sc.: Einleitung: Digitalisierung industrieller Arbeit, Nomos Verlagsgesellschaft mbH & Co. KG, 2018, S. 13–32. – URL <https://doi.org/10.5771/9783845283340-12>. – Zugriffsdatum: 10.10.2018
- [Hoffman u. a. 2002] HOFFMAN, Jörg ; HAHNE, Uwe ; KNÖDEL, Sebastian ; WETZSTEIN, Gordon: *Forschungs-/Laborprojekt Optisches Tracking*. 2002. – URL <https://www.uni-weimar.de/de/medien/professuren/medieninformatik/vr/teaching/ss-2002/forschungs-laborprojekt-optisches-tracking/>. – Zugriffsdatum: 22.09.2018
- [HTC 2018a] HTC: *Vive PRE User Guide*. 2018. – URL [https://www.htc.com/managed-assets/shared/desktop/vive/Vive\\_PRE\\_User\\_Guide.pdf](https://www.htc.com/managed-assets/shared/desktop/vive/Vive_PRE_User_Guide.pdf). – Zugriffsdatum: 21.09.2018
- [HTC 2018b] HTC: *VIVE Pro - VIVE Pro Full Kit*. 2018. – URL <https://www.vive.com/de/product/vive-pro-full-kit/>. – Zugriffsdatum: 21.09.2018
- [Microsoft 2018] MICROSOFT: *Why Hololens*. 2018. – URL <https://www.microsoft.com/microsoft-hololens/de-de/why-hololens>. – Zugriffsdatum: 02.09.2018
- [Milgram u. a. 1995] MILGRAM, Paul ; TAKEMURA, Haruo ; UTSUMI, Akira ; KISHINO, Fumio: *Augmented reality: a class of displays on the reality-virtuality continuum*. 1995. – URL <http://dx.doi.org/10.1117/12.197321>
- [Pilz 2018] PILZ: *Geschichte und Hintergrund Industrie 4.0*. 2018. – URL [https://www.pilz.com/imagecache/mam/pilz/images/import/05\\_Company/g\\_history\\_industry\\_4\\_0\\_de\\_3c\\_2017\\_10\\_1000x562-desktop-1512636285.jpg](https://www.pilz.com/imagecache/mam/pilz/images/import/05_Company/g_history_industry_4_0_de_3c_2017_10_1000x562-desktop-1512636285.jpg). – Zugriffsdatum: 21.05.2018

- [Qualcomm 2017] QUALCOMM: *On-device motion tracking for immersive mobile VR*. 2017. – URL <https://www.qualcomm.com/media/documents/files/on-device-motion-tracking-for-immersive-vr.pdf>. – Zugriffsdatum: 21.09.2018
- [Rajkumar u. a. 2010] RAJKUMAR, Ragunathan (. ; LEE, Insup ; SHA, Lui ; STANKOVIC, John: *Cyber-physical Systems: The Next Computing Revolution*. In: *Proceedings of the 47th Design Automation Conference*. New York, NY, USA : ACM, 2010 (DAC '10), S. 731–736. – URL <http://doi.acm.org/10.1145/1837274.1837461>. – ISBN 978-1-4503-0002-5
- [Reddy 2002] REDDY, Parineeth M.: *Embedded systems*. In: *Resonance* 7 (2002), Dec, Nr. 12, S. 20–30. – URL <https://doi.org/10.1007/BF02834526>. – ISSN 0973-712X
- [Ridder 2016] RIDDER, Michael: *thyssenkrupp treibt Digitalisierung des weltweiten Aufzugsservice weiter voran: Microsoft HoloLens verringert Wartungszeit*. 2016. – URL <https://www.thyssenkrupp.com/de/newsroom/pressemeldungen/press-release-114208.html>. – Zugriffsdatum: 15.09.2018
- [Slater und Wilbur 1997] SLATER, Mel ; WILBUR, Sylvia: *A Framework for Immersive Virtual Environments (FIVE): Speculations on the Role of Presence in Virtual Environments*. März 1997. – URL <https://doi.org/10.1162/pres.1997.6.6.603>. – Zugriffsdatum: 05.06.2018
- [University of Michigan 2015] UNIVERSITY OF MICHIGAN: *Michigan Micro Mote (M3) Makes History*. 2015. – URL <https://www.eecs.umich.edu/eecs/about/articles/2015/Worlds-Smallest-Computer-Michigan-Micro-Mote.html>. – Zugriffsdatum: 05.03.2018
- [Visbox, Inc. 2016] VISBOX, INC.: *VisCube C4 - CAVE Immersive 3D Display*. 2016. – URL <http://www.visbox.com/VisCube-models.pdf>. – Zugriffsdatum: 04.06.2018

- [Waltz 2017a] WALTZ, Sascha: Interaktion von AR-Devices und Cyber Physical Systems / Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg. <http://users.informatik.haw-hamburg.de/ubicomp/projekte/master2018-proj/waltz.pdf>, 2017. – Forschungsbericht
- [Waltz 2017b] WALTZ, Sascha: Sicherheit in Cyber Physical Systems / Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg. <http://users.informatik.haw-hamburg.de/ubicomp/projekte/master2017-proj/waltz.pdf>, 2017. – Forschungsbericht
- [Weiser 1999] WEISER, Mark: The Computer for the 21st Century. In: *SIGMOBILE Mob. Comput. Commun. Rev.* 3 (1999), jul, Nr. 3, S. 3–11. – URL <http://doi.acm.org/10.1145/329124.329126>. – ISSN 1559-1662
- [Wetzstein 2018] WETZSTEIN, Gordon: *Inertial Measurement Units I.* 2018. – URL <https://stanford.edu/class/ee267/lectures/lecture9.pdf>. – Zugriffsdatum: 30.09.2018
- [Witmer 2015] WITMER, Jodie: *Flight Sim up and running.* 2015. – URL <http://www.167aw.af.mil/News/Article-Display/Article/866346/flight-sim-up-and-running/>. – Zugriffsdatum: 25.02.2018
- [Zimmerman 1943] ZIMMERMAN, E A.: *Activities at Royal Naval Air Station Lee-on-solent.* 1943. – URL [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/76/Activities\\_at\\_Royal\\_Naval\\_Air\\_Station\\_Lee-on-solent%2C\\_13\\_To\\_17\\_September\\_1943\\_A19290.jpg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/76/Activities_at_Royal_Naval_Air_Station_Lee-on-solent%2C_13_To_17_September_1943_A19290.jpg). – Zugriffsdatum: 25.02.2018

# Versicherung über Selbstständigkeit

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit im Sinne der Prüfungsordnung nach §24(5) ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe.

Hamburg, 12. Oktober 2018

Ort, Datum

Unterschrift