



Björn Bliese

**EIN GEBRAUCHSTAUGLICHES
AUGMENTED REALITY-SYSTEM
FÜR GEOMETRISCHE ANALYSEN
IN DER PRODUKTENTSTEHUNG**

Ein gebrauchstaugliches Augmented Reality-System für geometrische Analysen in der Produktentstehung

Von der Fakultät Energie-, Verfahrens- und Biotechnik der Universität
Stuttgart zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von
Björn Bliese
aus Stadthagen

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Michael M. Resch
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Michael Bargende

Tag der mündlichen Prüfung: 18.12.2018

Institut für Höchstleistungsrechnen der Universität Stuttgart

2019

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit in der Montageplanung bei Mercedes-Benz Cars in Sindelfingen. Zum Gelingen dieser Dissertation haben viele Menschen beigetragen, denen ich an dieser Stelle danken möchte.

Besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. Michael M. Resch für das in mich gesetzte Vertrauen, die hervorragende Unterstützung sowie die großzügig gewährten Freiräume. Mein herzlicher Dank gilt außerdem Herrn Prof. Dr. Michael Bargende für die Übernahme des Mitberichts.

Herrn Dr. Oliver Geißel danke ich für die herausragende Betreuung, die zahllosen fruchtbaren Diskussionen sowie die vertrauensvolle Zusammenarbeit. Ohne sein fachliches und persönliches Engagement wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Großer Dank gebührt meinen Kolleginnen und Kollegen bei der Daimler AG. Insbesondere danke ich Carlos Reis für die hilfreichen Rückmeldungen aus der Praxis und die wertvollen Gespräche. Ebenfalls danke ich den Studentinnen und Studenten, die mich während dieser Arbeit tatkräftig unterstützt haben, besonders Caroline Talmon-Gros, Carina Häcker, Roman Jeroma und Matthias Wüstenhagen. Christine Keegan, Nils Piero und Sascha Neuhaus danke ich herzlich für das Gegenlesen.

Einen wesentlichen Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit leistete die sehr gute Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für Graphische Datenverarbeitung in Darmstadt. Insbesondere danke ich Herrn Dr. Ulrich Bockholt und Michael Schmitt für die aktive Unterstützung und den anregenden Ideenaustausch.

Meinen Eltern danke ich für den liebevollen Rückhalt und die stete Unterstützung. Mein größter Dank gilt meiner Frau Eva. Dir verdanke ich mehr, als ich je in Worte fassen könnte.

Kurzfassung

Augmented Reality beschreibt die Erweiterung der menschlichen Wahrnehmung der Realität durch virtuelle Zusatzinformationen. Die Technologie kann in der Produktentstehung für die gemeinsame geometrische Analyse physischer und virtueller Modelle eingesetzt werden. Sie verspricht damit großes Potenzial für eine engere Verzahnung physischer und virtueller Entwicklungsaktivitäten. Trotzdem werden Augmented Reality-Systeme heute kaum produktiv in der Produktentstehung eingesetzt.

Eine genauere Betrachtung der bekannten Anwendungen bestätigt die Potenziale von Augmented Reality für geometrische Analysen in Bezug auf Qualität, Kosten und Zeit der Produktentstehung. Für die Durchführung von Augmented Reality-Analysen sind in der Literatur verschiedene Systemlösungen beschrieben, welche sich hauptsächlich durch die eingesetzten Komponenten zur Lagebestimmung unterscheiden. Die einzelnen Augmented Reality-Systemkomponenten scheinen für sich betrachtet zwar technisch weitestgehend ausgereift, die Systeme bieten allerdings selten einen für den Anwender durchgängigen Gesamtprozess. Die Bedienung ist in der Regel sehr komplex und erfordert viel spezifisches Fachwissen.

Um Augmented Reality für geometrische Analysen in der Produktentstehung umfassend nutzbar zu machen, wird die Gebrauchstauglichkeit in den Mittelpunkt der folgenden Systementwicklung gestellt. Auf Basis einer ausführlichen Beschreibung des Nutzungskontextes werden die grundlegenden Anforderungen an ein gebrauchstaugliches Augmented Reality-System formuliert. Die möglichen Systemkomponenten werden bezüglich dieser Anforderungen bewertet und ausgewählt, die zugehörigen Prozesse werden aus Benutzersicht ausgestaltet und im Sinne einer möglichst hohen Gebrauchstauglichkeit strukturiert. Mit diesem Wissen wird eine Benutzerführung entwickelt, welche den Anwender durch den gesamten Untersuchungsprozess führt. Die Gebrauchstauglichkeit des so entwickelten Augmented Reality-Systems wird schließlich im Rahmen einer Probandenstudie evaluiert.

Abstract

Augmented Reality describes the extension of human perception of reality through virtually generated additional information. The technology can be used in product development to perform geometric analyses between physical and virtual models, thus promising great potential for closer integration of physical and virtual development. Nevertheless, Augmented Reality systems are hardly used productively in product development today.

A closer look at the known applications confirms the potential of Augmented Reality for geometric analyses in terms of quality, cost and duration of product development. For performing Augmented Reality analyses, different system designs are described in the literature, which mainly differ in terms of the used tracking methods. Although the individual system components appear to be technically mature to a large extent, they rarely offer a consistent user process. Operation is usually very complex and requires a great amount of specific knowledge.

In order to make Augmented Reality widely usable for geometric analyses in product development, the focus of the following system development is usability. Based on a detailed description of the usage context, the basic requirements for a usable Augmented Reality system are identified. The implementation possibilities of the individual system components are evaluated with regard to these requirements. The necessary components are selected and improved. The resulting processes are structured from a user's point of view to ensure a high usability. With this knowledge, a user guidance is developed which leads the user through the entire investigation process. The usability of the developed system is finally proven in a usability test.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	iii
Kurzfassung	iv
Abstract	v
Abkürzungen	x
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Zielstellung	3
1.3 Vorgehen	3
2 Grundlagen	7
2.1 Produktentstehung	7
2.1.1 Historie	7
2.1.2 Prozessmodell	12
2.1.3 Erfolgsfaktoren	13
2.2 Augmented Reality	15
2.2.1 Begriffsdefinition	15
2.2.2 Systemkomponenten	16
2.2.3 Registrierung	24
2.2.4 Anwendungen	27
2.3 Gebrauchstauglichkeit	30
2.3.1 Komponenten der Gebrauchstauglichkeit	31
2.3.2 Maße der Gebrauchstauglichkeit	32
2.3.3 Der menschenzentrierte Gestaltungsprozess	33
2.3.4 System Usability Scale	35
2.4 Zusammenfassung	37
3 Stand der Technik	38
3.1 Anwendungen	38
3.1.1 Abgrenzung	38

3.1.2	Umfeldanalyse	39
3.1.3	Qualitätsanalyse	41
3.1.4	Potenziale	42
3.2	Untersuchungswerkzeuge	44
3.2.1	Darstellung	44
3.2.2	Transformation	46
3.2.3	Vermessung	46
3.3	Beispielsysteme	46
3.3.1	Inside-out-Quadratmarkertracking	47
3.3.2	Outside-in-Baummarkertracking	50
3.3.3	Mechanisches Tracking	52
3.3.4	Lasertracking	55
3.4	Handlungsbedarfe	57
3.5	Forschungshypothese und weiteres Vorgehen	59
3.6	Zusammenfassung	60
4	Anforderungen	62
4.1	Nutzungskontext	62
4.1.1	Ziele	62
4.1.2	Benutzer	63
4.1.3	Untersuchungsobjekte	64
4.1.4	Rahmenbedingungen	66
4.2	Anforderungsbestimmung	68
4.2.1	Funktionale Anforderungen	68
4.2.2	Nicht-funktionale Anforderungen	70
4.3	Anforderungsanalyse	73
4.4	Zusammenfassung	75
5	Umsetzung	77
5.1	Konzeption	77
5.1.1	Trackingsystem	77
5.1.2	Visualisierungssystem	85
5.1.3	Eingabegerät	87
5.1.4	EDV-System	87
5.2	Benutzerprozess	90
5.2.1	Systemskizze	90
5.2.2	Prozessmodelle	91
5.2.3	Strukturierung	97
5.3	Benutzerführung	101
5.3.1	Vorgehen	102

5.3.2	Anforderungen	104
5.3.3	Finale Gestaltungslösung	107
5.4	Zusammenfassung	120
6	Evaluierung	122
6.1	Methodik	122
6.1.1	System Usability Scale	123
6.1.2	Fragebögen und Interviews	123
6.1.3	Lautes Denken und Beobachtung	123
6.1.4	Zeitmessungen	124
6.2	Aufbau und Durchführung	124
6.2.1	Materialien	124
6.2.2	Aufgaben	128
6.2.3	Ablauf	129
6.3	Hypothesen	129
6.3.1	Effektivität	130
6.3.2	Effizienz	130
6.3.3	Zufriedenstellung	130
6.4	Auswertung	131
6.4.1	Probanden	131
6.4.2	Effektivität	132
6.4.3	Effizienz	132
6.4.4	Zufriedenstellung	134
6.5	Zusammenfassung	138
7	Zusammenfassung und Ausblick	139
7.1	Zusammenfassung	139
7.2	Ausblick	143
A	Fragebogen Vorwissen	145
B	Fragebogen SUS-Punktzahl	146
	Abbildungsverzeichnis	147
	Tabellenverzeichnis	150
	Literaturverzeichnis	151

Abkürzungen

2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
AR	Augmented Reality
AV	Augmented Virtuality
CAD	Computer-aided Design
CAVE	Cave Automatic Virtual Environment
DIN	Deutsches Institut für Normung
DLL	Dynamic Link Library
DMU	Digital Mock-Up
EDV	Elektronische Datenverarbeitung
EN	Europäische Norm
GPS	Global Positioning System
HMD	Head-mounted-Display
ISO	International Organization for Standardization
IT	Informationstechnik
JT	Jupiter Tessellation
KS	Koordinatensystem
MR	Mixed Reality
OST	Optical-see-through
PDF	Portable Document Format
PDM	Produktdatenmanagement
SUS	System Usability Scale
USB	Universal Serial Bus
VDA	Verein der Automobilindustrie
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VNA	Virtuelle Netzhautanzeige
VR	Virtual Reality
VST	Video-see-through
WLAN	Wireless Local Area Network

1 Einleitung

Automobilhersteller stehen im 21. Jahrhundert vor enormen Herausforderungen. Der starke internationale Wettbewerb bewirkt einen stetig wachsenden Kosten- und Innovationsdruck, die Kunden fordern in immer kürzeren Abständen zunehmend komplexere, individuellere und qualitativ hochwertigere Produkte. Die fortschreitende Digitalisierung des Automobils führt aufgrund vergleichsweise schnelllebigere informationstechnischer Systeme zu einer weiteren kritischen Verkürzung der Produktlebensdauer.

Da die Produktlebenszyklen immer kürzer werden, muss auch die Zeitspanne von der Produktidee bis zum Markteintritt verkürzt werden. Entwicklung, Konstruktion und Erprobung von Produkten sowie Planung, Aufbau und Inbetriebnahme der benötigten Produktionssysteme müssen immer öfter und immer schneller durchgeführt werden. Die Planungs- und Entwicklungsaufgaben häufen sich und werden gleichzeitig komplexer [VDA12] [BGW10].

1.1 Motivation

Um den wachsenden Anforderungen zu genügen, ist eine stete Anpassung und Weiterentwicklung der eingesetzten Entwicklungs-, Konstruktions- und Planungsmethoden erforderlich. Computergestützte Technologien bieten hier enormes Potenzial. Produkt und Produktionssystem werden heute zunächst als virtuelle Modelle am Computer geplant und entwickelt, digitale Methoden und Werkzeuge erlauben eine Erprobung der Funktionsfähigkeit bereits vor dem Aufbau der ersten physischen Prototypen. Die zunehmende Verlagerung von Planungs- und Entwicklungstätigkeiten in die virtuelle Welt bewirkt insgesamt eine Verkürzung der Produktentstehungszeit, eine Senkung der Kosten sowie eine Verbesserung der Qualität [SHI⁺11].

Basis für einen virtuellen Prototyp ist ein in einem CAD-Programm (Computer-aided Design, computergestütztes Konstruieren) dreidimensional konstruiertes geometrisches Modell. Dieses geometrische Modell kann für verschiedene digitale

Simulationen genutzt werden, welche die Berechnung komplexer physikalischer Wirkzusammenhänge ermöglichen [SK97]. Virtuelle Prototypen verursachen nicht nur geringere Kosten als physische Versuchsträger, die Versuche lassen sich am Computer auch deutlich früher und schneller als in der Realität durchführen. Zusätzlich können die virtuellen Modelle eingesetzt werden, um den an der Produktentstehung beteiligten Personen wie Entwicklern, Designern, Konstrukteuren und Planern einen realistischen visuellen Eindruck des Produktes zu vermitteln. In der virtuellen Realität lassen sich z. B. Entwurfsprüfungen, Varianten- und Designvergleiche, Ergonomieuntersuchungen, Montage- und Verbauuntersuchungen, sowie Bewertungen von Anmutung und Qualität durchführen [Rad14].

Auch wenn mit den wachsenden digitalen Möglichkeiten mehr und mehr Tätigkeiten in die virtuelle Welt verlagert werden können, sind physische Prototypen weiterhin unerlässlich. Neben Forderungen des Gesetzgebers, für Automobilhersteller beispielsweise in Form von physischen Crashtests, lassen sich einige Zusammenhänge noch nicht realitätsgetreu am Computer simulieren. Die digitale und die physische Entwicklung stehen daher heute als gleichwertige Säulen der Produktentstehung nebeneinander [Gei12]. Die Entwicklung beginnt zunächst virtuell, bis ein gewisser Reifegrad erreicht ist. Mit diesem Wissen werden die ersten physischen Prototypen aufgebaut. Ab diesem Zeitpunkt laufen die digitale und die physische Entwicklung parallel zueinander, wobei die Erkenntnisse fortlaufend synchronisiert werden.

Eine vielversprechende Möglichkeit für die gezielte Zusammenführung virtueller und physischer Entwicklungsaktivitäten stellt Augmented Reality dar. Augmented Reality bezeichnet die Erweiterung der menschlichen Wahrnehmung der Realität durch virtuelle Zusatzinformationen. Mittels Augmented Reality können z. B. eine reale Fahrzeugkarosserie mit virtuellen Montageteilen ausgestattet oder eine reale Fabrik durch ein virtuelles Anlagenkonzept erweitert werden. Auch ein schneller visueller Abgleich physischer und virtueller Planungs- und Entwicklungsstände ist möglich. Zusätzlich kann Augmented Reality, ähnlich wie Virtual Reality, das intuitive Verständnis und die einfache Abstimmung der an einem Projekt beteiligten Personen fördern [Gei12].

Obwohl der Mehrwert von Augmented Reality für geometrische Analysen in der Produktentstehung mehrfach nachgewiesen wurde [Gei12] [Bad12] [Pen09] [Nöl06], konnten sich nur wenige Augmented Reality-Systeme über einen Demonstrations- und Prototypenstatus hinaus entwickeln und produktiv etablieren. Für Einrichtung und Betrieb von industriellen Augmented Reality-Systemen ist in der Regel viel Fachwissen erforderlich. Sie werden daher häufig durch

die Systementwickler selbst oder durch speziell geschulte Experten bedient [Pen09]. Von den an der Produktentstehung beteiligten Fachbereichen werden Augmented Reality-Systeme nur selten selbstständig für geometrische Analysen eingesetzt.

1.2 Zielstellung

Die Technologie Augmented Reality kann als ein möglicher Stellhebel zur Etablierung effizienter Planungs- und Entwicklungsprozesse an der Schnittstelle zwischen physischer und virtueller Realität gesehen werden. Durch einen umfassenden Einsatz im gesamten Produktentstehungsprozess lassen sich theoretisch die Planungs- und Entwicklungszeit reduzieren, die Qualität erhöhen sowie die Kosten senken. In der Praxis mangelt es heute jedoch an einfach und effizient nutzbaren Augmented Reality-Lösungen, sodass die Systeme noch immer einen gewissen Exotenstatus haben und das Potenzial der Technologie nicht ausgeschöpft werden kann. Diese Arbeit möchte einen Beitrag dazu leisten, Augmented Reality für geometrische Analysen produktiv zu etablieren. Die Forschungsfrage lautet:

Forschungsfrage: Welche Faktoren verhindern den breiten Praxiseinsatz von Augmented Reality für geometrische Analysen und wie kann die Technologie in der Produktentstehung umfassend nutzbar gemacht werden?

Zur Beantwortung sollen bekannte Augmented Reality-Anwendungen inklusive ihres Mehrwerts, die eingesetzten Analysemethoden und -werkzeuge sowie verschiedene Systemkonfigurationen untersucht werden. Auf dieser Basis sollen die Handlungsbedarfe zur Nutzbarmachung von Augmented Reality identifiziert und in der Folge ein gebrauchstaugliches Augmented Reality-System entwickelt werden, welches effektiv, effizient und zufriedenstellen nutzbar ist. Abschließend soll die Gebrauchstauglichkeit des entwickelten Augmented Reality-Systems bewertet werden.

1.3 Vorgehen

Der Aufbau dieser Arbeit kann Abbildung 1.1 entnommen werden. Nach der Einleitung im aktuellen Kapitel gliedert sich die Arbeit wie folgt:

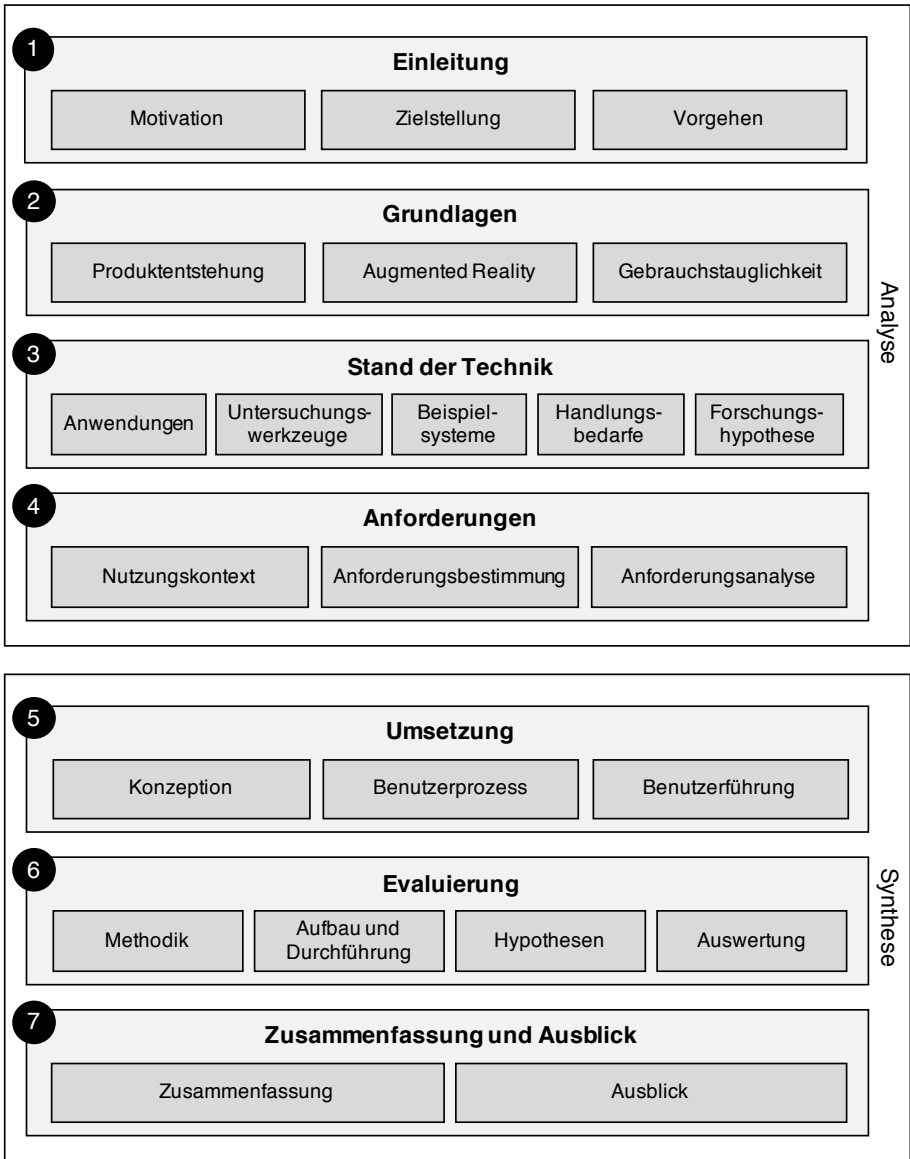


Abbildung 1.1: Aufbau der Arbeit

Kapitel 2: Grundlagen gibt dem Schwerpunkt der Arbeit entsprechend einen Überblick der Themenbereiche Produktentstehung, Augmented Reality und Gebrauchstauglichkeit. Die Beschreibung der Produktentstehung wird mit einem kurzen Exkurs in die Historie eingeleitet. Darauf aufbauend werden ein allgemeines Prozessmodell der modernen Produktentstehung vorgestellt und die aktuellen Herausforderungen an der Schnittstelle zwischen physischer und virtueller Planung und Entwicklung beleuchtet. Im Anschluss wird die Technologie Augmented Reality beschrieben. Auf Basis einer Begriffsdefinition werden die einzelnen Komponenten optischer Augmented Reality-Systeme hergeleitet und der Registrierungsvorgang zur Überlagerung physischer und virtueller Objekte mathematisch beschrieben. Einige Beispielanwendungen verdeutlichen die Potenziale von Augmented Reality und grenzen gleichzeitig den weiteren Untersuchungsfokus ab. Anschließend wird eine Einführung in das Konzept der Gebrauchstauglichkeit gegeben. Nach einer kurzen Erläuterung der einzelnen Komponenten der Gebrauchstauglichkeit werden der menschenzentrierte Gestaltungsprozess zur Entwicklung gebrauchstauglicher Systeme sowie die System Usability Scale-Punktzahl zur Bewertung der Gebrauchstauglichkeit vorgestellt.

Kapitel 3: Stand der Technik beleuchtet den Stand der Technik von Augmented Reality zur Analyse geometrischer Problemstellungen in der Produktentstehung. Technisch losgelöst werden zunächst aus der Literatur bekannte Anwendungsfälle inklusive ihrer Mehrwerte zusammengefasst. Für die geometrische Analyse des Zusammenspiels physischer und virtueller Umfänge kommen verschiedene Untersuchungswerkzeuge zum Einsatz, welche ebenfalls kurz vorgestellt werden. Anschließend werden aus der Literatur bekannte Systemkonfigurationen für die geometrische Analyse in der Produktentstehung näher betrachtet und die Handlungsbedarfe zur umfassenden Nutzbarmachung sowie darauf aufbauend die Forschungshypothese und das weitere Vorgehen abgeleitet.

Kapitel 4: Anforderungen beschreibt zunächst die grundlegenden Anwendungsziele sowie den erwarteten Nutzungskontext des zu entwickelnden Augmented Reality-Systems. Mit diesem Wissen werden die funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen an ein gebrauchstaugliches Augmented Reality-System definiert und analysiert.

Kapitel 5: Umsetzung beschreibt die Umsetzung der Anforderungen in einen Lösungsentwurf für das zu entwickelnde Augmented Reality-System. Die Anforderungen werden zunächst in ein Grobkonzept für das Gesamtsystem überführt. Anschließend werden die Benutzerprozesse für die Kamerakalibrierung, das Tracking sowie die CAD-Datenvorbereitung modelliert. Der sich dadurch erge-

bende Gesamtprozess wird strukturiert und durch eine Benutzerführung ergänzt, welche die intuitive Bedienbarkeit fördern und eine einfache Erlernbarkeit sicherstellen soll.

Kapitel 6: Evaluierung bewertet das entwickelte Augmented Reality-System. Im Rahmen einer Probandenstudie wird die Gebrauchstauglichkeit für den Anwendungsfall der Qualitätsanalyse eines Betriebsmittels bestimmt, wobei die drei Kriterien Effektivität, Effizienz und Zufriedenstellung getrennt voneinander bewertet werden.

Kapitel 7: Zusammenfassung und Ausblick fasst die Erkenntnisse der vorliegenden Arbeit zusammen und gibt einen Ausblick auf mögliche zukünftige Forschungsarbeiten.

Im Anhang befinden sich das Abbildungs-, das Tabellen- und das Literaturverzeichnis sowie die für die Evaluierung genutzten Fragebögen zur Ermittlung des Vorwissens der Probanden und zur Ermittlung der Gebrauchstauglichkeit des entwickelten Augmented Reality-Systems.

2 Grundlagen

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit soll ein gebrauchstaugliches Augmented Reality-System für die geometrische Analyse in der Produktentstehung entwickelt werden. In diesem Kontext werden eine kurze Einführung in den Prozess der Produktentstehung am Beispiel der Automobilindustrie, die Technologie Augmented Reality sowie das Konzept der Gebrauchstauglichkeit interaktiver Systeme gegeben.

2.1 Produktentstehung

Die folgenden Abschnitte beschreiben den Prozess der industriellen Produktentstehung am Beispiel der Automobilindustrie. Nach einem kurzen Rückblick in die Historie werden ein allgemeines Vorgehensmodell für den modernen Produktentstehungsprozess vorgestellt und die aktuellen Herausforderungen geschildert.

2.1.1 Historie

Die Automobilindustrie befindet sich seit der Erfindung des Automobils im ausgehenden 19. Jahrhundert in einem steten Wandel. Soziale, ökonomische und politische Veränderungen im Unternehmensumfeld sowie immer neue technische Möglichkeiten wirken sich sowohl auf Produkte als auch auf Arbeitsprozesse aus und fordern eine fortlaufende Anpassung und Weiterentwicklung der eingesetzten Entwicklungs-, Konstruktions- und Produktionsmethoden.

Frühphase des Automobils

Am 29. Januar 1886 meldete Carl Benz sein dreirädriges „Fahrzeug mit Gasmotorenbetrieb“ zum Patent an [Gül11]. Zwar gab es zuvor schon Konstruktionen mit Dampf- oder Elektroantrieben und auch frühe Versuche mit Verbrennungsmotoren, jedoch wird dieses Datum allgemein als Geburtsstunde des modernen

Automobils gesehen. Bereits im Oktober desselben Jahres baute Gottlieb Daimler (der zu diesem Zeitpunkt noch Däumler hieß, sich aber später umbenannte) einen konventionellen Pferdewagen zu einem ersten praktisch brauchbaren vier-rädrigen Fahrzeug mit Verbrennungsmotor um [Sei09].

Das automobiler Konzept fand schnell Nachahmer und wurde zu einem marktfähigen Produkt weiterentwickelt. Bereits in den 1890ern gab es Automobilmanufakturen in ganz Europa und den Vereinigten Staaten [Gül11]. Zu dieser Zeit wurde das Automobil in einem werkstattähnlichen Umfeld kundenindividuell in Einzelfertigung hergestellt [Kle07]. Der Werkstattmeister war für Entwicklung, Konstruktion und Herstellung des Produktes gleichermaßen verantwortlich. Ihm fielen damit umfassende Gestaltungs- und Optimierungsmöglichkeiten sowohl des Produktes als auch der erforderlichen Arbeitsschritte zu [SK97].

Mit der Einzelerienfertigung bestanden für die Kunden umfassende Individualisierungsmöglichkeiten, von der Karosserie über die Innenausstattung bis zur Motorisierung. Allerdings schlug sich diese Produktionsart auch in äußerst hohen Fertigungskosten und sehr langen Fertigungszeiten nieder [KMO⁺09]. Die Herstellkosten pro Fahrzeug waren ungeachtet der Anzahl der hergestellten Fahrzeuge stets gleich, Skalierungseffekte konnten nicht erzielt werden. Das Automobil war dadurch in seiner Frühphase ein absolutes Luxusgut und nur für sehr wenige Menschen finanziell erreichbar [HB08].

Gegen Ende des 19. Jahrhunderts entstanden allmählich von den Werkstätten abgetrennte Konstruktionsabteilungen. Die fortschreitende Vereinheitlichung von Maßen, Typen und Verfahrensweisen ermöglichte es, die Fahrzeuge immer stärker arbeitsteilig zu entwickeln. Konstruktive Veränderungen wurden nun nicht mehr durch den Werkstattmeister direkt am Fahrzeug, sondern durch immer stärker spezialisierte Konstrukteure auf dem Papier entworfen. Gemäß dieser konstruktiven Vorgaben wurden die Fahrzeuge dann in der Werkstatt gefertigt. Durch die räumliche und organisatorische Aufspaltung in Konstruktion und Fertigung wurde es allerdings auch zunehmend anspruchsvoller, die fertigungstechnischen Auswirkungen der Konstruktion abzuschätzen [SK97].

Massenmotorisierung

Den nächsten Schritt auf dem Weg zur Massenmotorisierung unternahm Ransom Eli Olds im Jahr 1901, indem er die ihm aus den Konserven- und Fleischfabriken Chicagos bekannte Fließfertigung für die Automobilproduktion adaptierte [Nic13]. Bei der Fließfertigung erfolgt die räumliche Anordnung von Betriebsmitteln und Arbeitsplätzen nach dem Fertigungsablauf. Olds setzte dazu bewegliche

Holzgestelle ein, auf denen die Fahrzeuge von Station zu Station geschoben wurden [Sch09].

Henry Ford entwickelte dieses Konzept konsequent weiter und führte 1913 die Fließbandproduktion bei seinem Modell T ein. Bei Ford bewegte eine Dampfmaschine das Fließband in einem definierten Takt, die Arbeiter bauten das Fahrzeug aus standardisierten Komponenten arbeitsteilig zusammen [Sch09]. Der vorgegebene zeitliche Rhythmus und die weitere Standardisierung der einzelnen Arbeitsschritte ermöglichten nochmals kürzere Durchlaufzeiten bei gleichzeitig sinkenden Fertigungskosten. Es wurde nun nicht mehr kundenindividuell nach dem Werkstattprinzip zu kleinen Stückzahlen und hohen Kosten produziert, sondern zu großen Stückzahlen und deutlich geringeren Kosten in industriellen Fabriken. Das Automobil wurde für jedermann erschwinglich und verbreitete sich rasant [Rei10].

Steigende Komplexität

In den folgenden Jahren wurde der Produktentstehungsprozess durch immer weitere Untergliederung, Differenzierung und Spezialisierung stetig weiter rationalisiert. Dadurch wurde es in den 1940er Jahren möglich, den Prozess in einer allgemeinen Form abstrakt zu beschreiben und in mehrere inhaltlich aufeinander aufbauende Phasen zu unterteilen [SK97]. Diese Phasen liefen traditionell zeitlich nacheinander ab und bauten auf den Erkenntnissen der jeweils vorangegangenen Phase auf. Der vorigen Aufspaltung in Konstruktion und Fertigung folgend bildeten sich immer weiter spezialisierte Fachdisziplinen heraus, wie etwa auf Produktseite die Forschung, das Design, die Entwicklung und die Konstruktion, oder auf Produktionsseite die Fabrikplanung, die Betriebsmittelplanung und die Prozessplanung.

Um den Gesamtplanungsaufwand des Produktionssystems möglichst gering und die zugehörige Logistik möglichst einfach zu halten, gab es zu Beginn der Massenfertigung nahezu keine Individualisierungsmöglichkeiten. Ein Zitat von Henry Ford aus dem Jahr 1922 verdeutlicht die damalige Haltung vieler Hersteller: „*Any customer can have a car painted any color that he wants so long as it is black*“ [FC22]. Die Auswahl der Fahrzeugfarbe wurde der Tatsache geopfert, dass schwarze Farbe am schnellsten trocknet. Ford konnte sein T-Modell durch solche radikalen Rationalisierungsmaßnahmen zu erschwinglichen Preisen millionenfach verkaufen [Nic13].

Als die Massenmotorisierung nach dem zweiten Weltkrieg in den 1950er Jahren auch Europa erreichte, war diese Strategie nicht mehr zeitgemäß. Der globale Wettbewerb unter den Fahrzeugherstellern nimmt seitdem kontinuierlich zu,

durch die steigenden Kundenerwartungen hinsichtlich Technik, Design und Qualität sowie immer strengere Umweltauflagen seitens der Gesetzgeber werden die Fahrzeuge immer komplexer [EHA03]. Individualisierungsmöglichkeiten und technische Innovationen werden nun als Differenzierungsmerkmale gegenüber dem Wettbewerb betrachtet und sind heute, neben dem Preis, ein entscheidendes Kaufkriterium für die Kundschaft [WFO09].

Um jede noch so kleine Marktnische abdecken zu können, reagieren die Fahrzeughersteller mit einer kontinuierlich steigenden Anzahl an Produktvarianten und -derivaten, wodurch immer neue Fahrzeugkonzepte und -klassen entstehen [Rei10] [Hei10]. Gleichzeitig zur steigenden Gesamtkomplexität werden die Produktlebens- und Innovationszyklen immer kürzer, die Fahrzeuge müssen immer schneller zur Marktreife gebracht werden. Um diese Herausforderungen zu beherrschen, müssen Automobilhersteller auch im Produktentstehungsprozess selbst innovativ sein. Die fortschreitende Integration computergestützter Methoden und Werkzeuge und die daraus resultierende Virtualisierung von Produkt und Produktionssystem bieten hierfür großes Potenzial [Zim01].

Virtualisierung

Den Grundstein für die Virtualisierung der Produktentstehung legte in den 1970er Jahren die rechnergestützte Konstruktion mit sogenannten CAD-Programmen (Computer-aided Design, rechnergestütztes Konstruieren). CAD-Programme dienten zunächst als Hilfswerkzeug zum technischen Zeichnen. Mit ihnen wurden, ebenso wie zuvor auf dem Papier, zweidimensionale Ansichten des späteren Produktes erstellt.

Mit steigender Leistungsfähigkeit der Systeme verbreiteten sich ab Ende der 1980er Jahre auch dreidimensionale Konstruktionsprogramme. Mit ihnen kann am Rechner ein digitales 3D-Modell erstellt werden, welches das spätere Endprodukt sowie die einzelnen Komponenten geometrisch vollständig definiert. Durch die Rechnerunterstützung können die Modelle einfach geändert, wiederverwendet und ergänzt werden, bis sie den gewünschten Anforderungen entsprechen. Die Visualisierung der Modelle ermöglicht es, das Produkt frei zu drehen, von verschiedenen Seiten zu betrachten und Schnitte zu erzeugen, was bei manueller Bearbeitung häufig viel Zeit in Anspruch nahm. Durch die Rechnerunterstützung konnte die Konstruktionsgeschwindigkeit deutlich erhöht werden [BGW10] [SK97].

Die nächste Evolutionsstufe stellte in den 1990er Jahren die rechnerorientierte Produktmodellierung dar. Zusätzlich zu der geometrischen Gestalt werden auch weitere Produkteigenschaften und -funktionen am Computer geplant, entwickelt

und abgesichert. Durch digitale Simulationstechniken können komplexe physikalische Berechnungen durchgeführt werden [SK97], etwa Mehrkörpersimulationen zur Erprobung dynamischer oder kinematischer Zusammenhänge, die Finite Elemente-Methode zur Berechnung von Verformungen unter Krafteinwirkung oder strömungsmechanische Simulationen zur Berechnung des physikalischen Verhaltens von Fluiden. Auch für die Fabrikplanung entwickelten sich allmählich spezialisierte digitale Werkzeuge, welche durch Verknüpfung von betriebswirtschaftlichen Funktionen der Produktionsplanung und -steuerung mit technischen Funktionen aus dem CAD-Bereich eine systematische und zielgerichtete Planung unterstützen [BGW10].

Die zunehmende Abbildung aller Eigenschaften des Produktes, des Produktionssystems und der zugehörigen Prozesse in der virtuellen Welt führt seit den 2000er Jahren zur virtuellen Produktentstehung. Auf Produktseite wird die virtuelle Entwicklung durch den digitalen Prototypen, den sogenannten Digital Mock-Up (DMU), beschrieben. Der Digital Mock-Up ist eine realistische Computersimulation eines Produktes mit allen erforderlichen Funktionalitäten zur Unterstützung von Design, Entwicklung, Fertigung und Wartung, welche als Plattform für die Produkt- und Prozessentwicklung, die Kommunikation und Entscheidungsfindung vom ersten Konzept bis hin zu Wartung und Produktrecycling dient [Cug97]. Der DMU ermöglicht den virtuellen Zusammenbau von Bauteilen und damit z. B. die Analyse und Absicherung im Gesamtfahrzeug hinsichtlich Kollisionsfreiheit, Mindestabständen und Montagefähigkeit. Für die durchgängige digitale Gestaltung sowohl des Produktes als auch der zur Herstellung notwendigen Prozesse und Einrichtungen bis hin zur kompletten Fabrik hat sich der Begriff Digitale Fabrik etabliert [BGW10] [SK97]. Der VDI definiert den Begriff Digitale Fabrik wie folgt: *„Die Digitale Fabrik ist der Oberbegriff für ein umfassendes Netzwerk von digitalen Modellen, Methoden und Werkzeugen - u. a. der Simulation und dreidimensionalen Visualisierung - die durch ein durchgängiges Datenmanagement integriert werden. Ihr Ziel ist die ganzheitliche Planung, Evaluierung und laufende Verbesserung aller wesentlichen Strukturen, Prozesse und Ressourcen der realen Fabrik in Verbindung mit dem Produkt“* [VDI08].

Durch die wachsenden digitalen Möglichkeiten können immer mehr Tätigkeiten in die virtuelle Welt verlagert werden. Trotzdem spielen physische Prototypen weiterhin eine wichtige Rolle. Einige Zusammenhänge lassen sich heute noch nicht realitätsgetreu am Computer simulieren, zudem fordert der Gesetzgeber von Automobilherstellern Nachweise für sicherheitskritische Produkteigenschaften z. B. in Form physischer Crashtests. Somit stehen die digitale und die physische Entwicklung heute als gleichwertige Säulen der Produktentstehung nebeneinander [Gei12].

2.1.2 Prozessmodell

Für den komplexen interdisziplinären Produktentstehungsprozess existieren in der Literatur unterschiedliche Vorgehensmodelle, welche sich z. B. durch ihren Anfangs- und Endpunkt oder bezüglich ihrer Komplexität unterscheiden. Die meisten Modelle unterteilen den Produktentstehungsprozess durch Meilensteine in inhaltlich aufeinander aufbauende Phasen. Die in der Automobilindustrie weithin anerkannten Vorgehensmodelle, etwa in der Produktentwicklung die VDI-Richtlinie 2221 zum Entwickeln und Konstruieren technischer Produkte [VDI93] oder die verschiedenen Abwandlungen des V-Modells [VDI04] und in der Produktionssystementwicklung z. B. die VDI-Richtlinie 5200 [VDI09] zur Fabrikplanung geben zwar eine erste grobe Orientierung, werden jedoch von den meisten Unternehmen spezifisch angepasst [ES09].

Für eine abstrakte Darstellung des Produktentstehungsprozesses wird Abbildung 2.1 betrachtet. Die Produktentstehung erstreckt sich von der Geschäftsidee bis zum Serienanlauf eines Produktes und kann grob in die drei Aufgabenbereiche strategische Produktplanung, Produktentwicklung und Produktionssystementwicklung eingeteilt werden. Die zyklische Darstellung betont, dass der Produktentstehungsprozess heute nicht mehr als bloße Aneinanderreihung von Tätigkeiten verstanden wird, sondern als integrativer und iterativer Prozess, bei

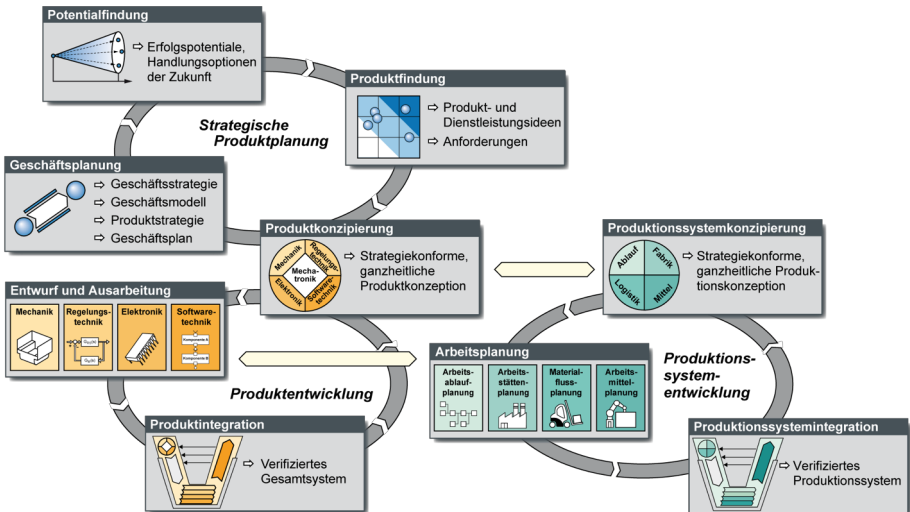


Abbildung 2.1: Produktentstehungsprozess als Folge von Zyklen [Gau13]

dem verschiedene Fachdisziplinen wie z. B. Design, Maschinenbau, Elektronik oder Informatik eng miteinander zusammenarbeiten müssen [Gau13] [Gau12].

Die **strategische Produktplanung** umfasst die Potential- und Produktfindung sowie die Geschäftsplanung und mündet in der Produktkonzipierung. Zunächst werden in der Potentialfindung Erfolgspotentiale abgeschätzt und anschließend im Rahmen der Produktfindung mit neuen Produkt- und Dienstleistungsideen erschlossen. Die Geschäftsplanung entwirft parallel eine Geschäftsstrategie und ermittelt dazu mögliche Marktsegmente sowie Markteintrittsszenarien. Daraus wird eine Produktstrategie entwickelt, welche das Produktprogramm inklusive möglicher Varianten und Produktpflegemaßnahmen über den Produktlebenszyklus beinhaltet [Gau13] [Gau12].

Die **Produktentwicklung** umfasst die Produktkonzipierung, den Entwurf und die Ausarbeitung der Produktkomponenten sowie die Integration der einzelnen Ergebnisse zu einer Gesamtlösung. Die Produktkonzipierung legt den grundsätzlichen Aufbau und die physikalische sowie logische Wirkweise des Produktes in einer groben funktionsbestimmenden Spezifikation fest. Darauf aufbauend finden der Entwurf und die Ausarbeitung der einzelnen Produktkomponenten durch Experten z. B. aus den Bereichen Mechanik, Steuerungs- und Regelungstechnik, Elektronik und Softwaretechnik statt. Die Teilergebnisse aus den beteiligten Disziplinen werden im Rahmen der Produktintegration zusammengeführt, um einen Funktionsnachweis für das Gesamtsystem zu erbringen [Gau13] [Gau12].

Die **Produktionssystementwicklung** umfasst die Arbeitsablaufplanung, die Arbeitsmittelplanung, die Produktionslogistik und die Arbeitsstättenplanung. Nachdem in der Arbeitsablaufplanung der Fertigungsablauf und die zur Herstellung des Produktes benötigten Betriebsmittel definiert wurden, befasst sich die Arbeitsmittelplanung mit der Planung der Maschinen und Werkzeuge, die für die Durchführung der Arbeitsvorgänge notwendig sind. Die Produktionslogistik plant den gesamten Materialfluss vom Wareneingang bis zum Versand inklusive der erforderlichen Ausrüstung. Schließlich werden durch die Arbeitsstättenplanung die bauliche Struktur des Fertigungsbetriebes, das Fertigungssystem und der innerbetriebliche Materialfluss aufeinander abgestimmt [Gau13] [Gau12].

2.1.3 Erfolgsfaktoren

Für produzierende Unternehmen ist die Aufrechterhaltung und Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit im Kontext der fortschreitenden Globalisierung eine zentrale Herausforderung. Die Unternehmen sind gefordert, Produkte in immer kürzerer Zeit zu geringeren Kosten mit immer höherer Qualität zu produzieren.

Das in Abbildung 2.2 dargestellte magische Dreieck verdeutlicht die wechselseitige Abhängigkeit der drei Zielgrößen Kosten, Qualität und Zeit [VBH⁺09] [Eng06] [KW04].

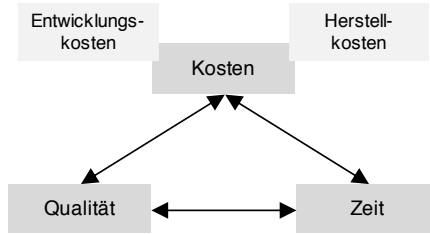


Abbildung 2.2: Magisches Dreieck der Produktentstehung nach [Eng06]

Die **Qualität** der Produktentstehung beschreibt die Quantität und Qualität der Ergebnisse der einzelnen Arbeitsschritte sowie des Endproduktes. Sie ist abhängig von der verfügbaren Zeit sowie den verfügbaren Ressourcen wie z. B. Geldmitteln, Sachmitteln, Personalkapazitäten und Qualifikationen. Die Produktqualität muss von Anfang an sichergestellt werden, denn je später im Entwicklungsprozess Qualitätsmängel festgestellt werden, desto kostspieliger werden Nachbesserungen. Werden kritische Qualitätsmängel erst beim Kunden entdeckt, kann zudem der Ruf eines Unternehmens nachhaltig beschädigt werden [VBH⁺09] [Eng06] [KW04].

Die **Zeit** umfasst die Dauer von der ersten Produktidee bis zum Produktionsanlauf bzw. Markteintritt. Der Zeitaufwand ist abhängig von der geforderten Qualität sowie den zur Verfügung stehenden Ressourcen. Zunehmend komplexere Produkte sowie die steigende Variantenvielfalt bewirken einen kontinuierlichen Anstieg des Entwicklungsaufwands. Hohe Preise lassen sich für ein Produkt aber nur dann verlangen, solange keine oder wenig Konkurrenz am Markt vorhanden ist. Je kürzer die Zeit bis zum Markteintritt ist, desto höher ist somit die Gesamtrentabilität eines Produktes [VBH⁺09] [Eng06] [KW04].

Die **Kosten** der Produktentstehung umfassen alle Ressourcen zur Entwicklung und Produktion eines Produktes. Sie werden durch die zur Verfügung stehende Zeit sowie die geforderte Qualität beeinflusst und bestimmen neben der Zahlungsbereitschaft der Kunden die Preisbildung des Produktes am Markt. Starke Kostentreiber sind der Innovationsdruck und die zunehmende Anzahl an Produktvarianten, welche zu einer starken Zunahme der Produkt- und Prozesskomplexität und somit zu höheren Entwicklungs- und Herstellkosten führen.

Für weniger innovative Produkte oder in einem gesättigten Markt ist der Kostendruck noch größer, da sie sich nur über den Preis und entsprechend niedrige Herstellkosten absetzen lassen [VBH⁺09] [Eng06] [KW04].

Um die Wettbewerbsfähigkeit eines Unternehmens sichern und ausbauen zu können, müssen die drei übergeordneten Erfolgsfaktoren Qualität, Zeit und Kosten ständig optimiert werden. Dabei ist die wechselseitige Abhängigkeit der Größen zueinander zu beachten. Soll z. B. die Zeit bis zum Markteintritt verkürzt werden, kann dies zu Einbußen bei Qualität und Reifegrad des Produktes führen. Wird die Verkürzung der Entwicklungszeit hingegen durch einen erhöhten Ressourceneinsatz erkauft, relativieren sich die Vorteile des schnelleren Markteintritts durch die erhöhten Entwicklungskosten. Die wechselseitige Abhängigkeit der drei Größen Qualität, Zeit und Kosten gilt allerdings nur innerhalb eines gegebenen Systems. Die gemeinsame Optimierung aller drei Erfolgsfaktoren ist möglich, wenn das vorhandene System umstrukturiert wird. So können z. B. durch den Einsatz neuer Konstruktions-, Planungs- oder Entwicklungsmethoden oder durch die Verwendung neuer Fertigungstechnologien gleichzeitig die Qualität erhöht und die Zeit sowie die Kosten gesenkt werden [VBH⁺09] [Eng06] [KW04] [Ger02].

2.2 Augmented Reality

Die folgenden Abschnitte beschreiben die Grundlagen der Technologie Augmented Reality. Auf Basis einer Begriffsdefinition werden zunächst die wesentlichen Komponenten eines optischen Augmented Reality-Systems hergeleitet. Anschließend werden verschiedene Umsetzungsmöglichkeiten für die einzelnen Komponenten vorgestellt und durch eine kurze mathematische Betrachtung der Registrierung physischer und virtueller Objekten ergänzt. Schließlich werden einige Anwendungsbeispiele aus dem kommerziellen sowie dem industriellen Bereich vorgestellt.

2.2.1 Begriffsdefinition

Augmented Reality (AR, erweiterte Realität) bezeichnet die Erweiterung der menschlichen Wahrnehmung der Realität durch virtuelle Zusatzinformationen. Zur Abgrenzung von dem häufig synonym genutzten Begriff Mixed Reality wird das sogenannte Reality-Virtuality-Continuum nach Milgram und Kishino in Abbildung 2.3 betrachtet.

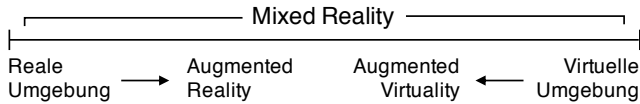


Abbildung 2.3: Reality-Virtuality-Continuum, in Anlehnung an [MK94]

Auf der linken Seite des Reality-Virtuality-Continuums befindet sich die uns umgebende, physisch greifbare Realität. Auf der gegenüberliegenden rechten Seite findet sich die vollständig im Computer generierte virtuelle Umgebung oder Virtuelle Realität (VR). Sämtliche Kombinationsformen dieser beiden Welten werden als Mixed Reality (MR, gemischte Realität) bezeichnet. Je nach Anteil der Realität bzw. Virtualität wird Mixed Reality weiter untergliedert. Augmented Reality erweitert die Wahrnehmung der realen Umgebung mit virtuellen Umfängen. Augmented Virtuality (AV, erweiterte Virtualität) beschreibt eine virtuelle Umgebung, welche mit realen Umfängen angereichert wird [DM96] [MK94]. Im praktischen Sprachgebrauch wird der Begriff Augmented Virtuality eher selten genutzt, Augmented Reality und Mixed Reality werden dagegen häufig synonym verwendet.

2.2.2 Systemkomponenten

In der Literatur wird zur Charakterisierung von Augmented Reality-Systemen häufig die technologisch unabhängige Definition von Azuma verwendet. Demnach erfüllt ein AR-System drei Aufgaben [Azu97]:

- Kombination von Realität und Virtueller Realität
- Registrierung in 3D
- Interaktion in Echtzeit

Der technologisch unabhängig gehaltenen Definition folgend können Augmented Reality-Systeme theoretisch alle menschlichen Sinne (Sehen, Riechen, Schmecken, Fühlen, Hören) erweitern. In der Praxis dominieren allerdings bislang visuelle Systeme. Die zum Betrieb eines visuellen Augmented Reality-Systems notwendigen Komponenten können direkt aus den drei oben genannten Aufgaben abgeleitet werden. Für die Registrierung müssen die Lage des Betrachters und der zu überlagernden Objekte relativ zueinander bestimmt werden. Der Prozess der Lagebestimmung wird als Tracking bezeichnet, die zugehörige

Komponente als Trackingsystem. Das Trackingsystem gibt die Lageinformationen an ein EDV-System weiter. Auf Basis der Trackingdaten wird durch das EDV-System die darzustellende Lage der virtuellen Objekte berechnet und ein perspektivisch korrekt überlagertes Bild generiert. Das virtuelle Bild wird dem Anwender über ein Visualisierungssystem dargestellt. Die Bedienung des Augmented Reality-Systems sowie die Interaktion mit den virtuellen Elementen erfolgen über Eingabegeräte.

Visualisierungssysteme

Zur Darstellung der Kombination von Realität und Virtualität gibt es verschiedene technische Möglichkeiten. Eine Abgrenzung kann anhand der prinzipiellen Art der Darstellung erfolgen. Die Überlagerung der freien Sicht des Anwenders wird als *optical-see-through* bezeichnet, die Überlagerung eines durch den Anwender betrachteten Videobildes als *video-see-through*. Eine andere Abgrenzung kann auf Basis der eingesetzten Technologie erfolgen. So kann etwa zwischen auf dem Kopf getragenen *Head-mounted-Displays (HMDs)*, monitorbasierten sowie projektorbasierten Systemen unterschieden werden. Allgemein müssen bei der Verwendung von HMDs ergonomische Aspekte wie z. B. ein ausreichendes Sichtfeld, ein möglichst geringes Gewicht sowie eine ausreichende Stromversorgung im mobilen Betrieb beachtet werden [Her06] [Azu97].

Optical-see-through-HMDs sind semitransparente Displays, die den direkten Blick auf die physische Umgebung ermöglichen. Abbildung 2.4 zeigt eine Prinzipskizze. Die virtuellen Informationen werden z. B. über einen halbdurchlässigen Spiegel in das Sichtfeld eingeblendet und transparent dargestellt. Das reale Umfeld scheint durch den halbdurchlässigen Spiegel immer durch [Tön10] [Azu97].

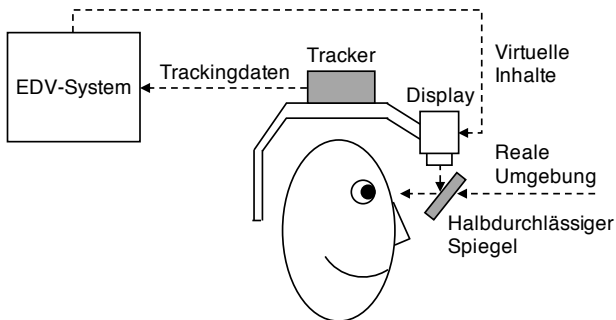


Abbildung 2.4: Optical-see-through-HMD, in Anlehnung an [Azu97]

Um mit OST-HMDs eine hohe Überlagerungsgenauigkeit zwischen physischen und virtuellen Objekten zu erreichen, muss unter anderem die Position der Augen relativ zu den semitransparenten Displays genau bekannt sein. Dies erfordert eine aufwendige Kalibrierung, die entsprechenden Methoden und Algorithmen sind Gegenstand aktueller Forschung [IK14].

Video-see-through-HMDs stellen die Realität indirekt durch ein Videobild auf einem Display dar, auf welchem auch die virtuellen Inhalte ergänzt werden. Durch die indirekte Wahrnehmung der Realität wird die intuitive Orientierung in der Umgebung gegenüber OST-HMDs erschwert. Abbildung 2.5 zeigt eine Prinzipskizze.

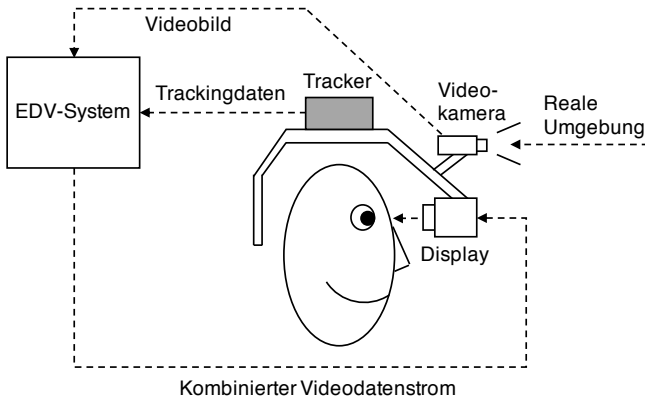


Abbildung 2.5: Video-see-through-HMD, in Anlehnung an [Azu97]

Um mit Video-see-through-Systemen eine hohe Überlagerungsgenauigkeit zwischen physischen und virtuellen Objekten zu erreichen, müssen die Abbildungseigenschaften der verwendeten Kamera und des zugehörigen Objektivs genau bekannt sein. Sie werden im Rahmen einer Kamerakalibrierung ermittelt (vgl. Abschnitt 2.2.3).

Monitorbasierte Systeme können in solche mit und ohne feste Kopplung zwischen Kamera und Monitor unterteilt werden. Beide Varianten fallen in die Kategorie der Video-see-through-Systeme. Besteht entsprechend Abbildung 2.6 keine feste Kopplung zwischen Kamera und Monitor, können beide unabhängig voneinander im Raum positioniert werden. In den meisten Fällen wird dann ein örtlich feststehender Monitor verwendet, die Kamera kann frei in der Umgebung bewegt werden. Bei handgehaltenen Systemen, etwa Smartphones oder Tablet-

computern, sind Kamera und Monitor dagegen fest miteinander verbunden und können frei im Sichtfeld des Anwenders positioniert werden [Tüm09] [Azu97].

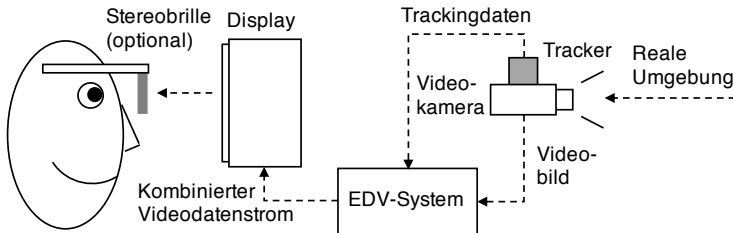


Abbildung 2.6: Monitorbasiertes System, in Anlehnung an [Azu97]

Um mit monitorbasierten Systemen eine hohe Überlagerungsgenauigkeit von physischen und virtuellen Objekten zu erreichen, müssen ebenso wie bei OST-HMDs die Abbildungseigenschaften der Videokamera und des zugehörigen Objektivs ermittelt werden (vgl. Abschnitt 2.2.3).

Projektorbasierte Systeme können als eine weitere Ausprägung der Optical-see-through-Systeme betrachtet werden. Die virtuellen Inhalte werden zum Beispiel direkt auf die zu überlagernden physischen Objekte projiziert. Dies setzt allerdings eine möglichst nicht reflektierende und nicht gemusterte Projektionsfläche voraus, was die Anwendungsmöglichkeiten in der Praxis stark einschränkt [BST11]. Einige Forschungsarbeiten untersuchen auch die direkte Projektion der virtuellen Inhalte auf die Netzhaut des Anwenders. Diese Systeme befinden sich allerdings noch in einem frühen Prototypenstadium [JBM⁺17] [MGK17].

Trackingsysteme

Um eine perspektivisch korrekte Kombination von realen und virtuellen Objekten zu ermöglichen, muss die Lage des Anwenders bzw. der Kamera gegenüber dem zu überlagernden physischen Objekt ermittelt werden. Hierzu kommen verschiedene Trackingtechnologien zum Einsatz, welche sich nach ihrem physikalischen Wirkprinzip unterscheiden lassen.

Optische Trackingsysteme bestehen aus den Komponenten Sender und Empfänger. Der Sender schickt ein optisches Signal aus, welches im Empfänger, z. B. einer Videokamera, durch Fotosensoren aufgenommen wird. Aus diesem Bildsignal werden mithilfe von Bildverarbeitungsmethoden die Lageinformationen bestimmt. Das optische Tracking arbeitet dabei nur so lange korrekt, wie eine

Sichtverbindung zwischen Sender und Empfänger besteht. Alle Trackingverfahren, die nach dem Sender-Empfänger-Prinzip arbeiten, können auf zwei grundsätzliche Arten angeordnet werden. Bei Inside-out-Systemen wird der Empfänger (etwa eine Kamera) frei im Raum bewegt, die Sender (z. B. die optischen Marker) sind in der physischen Umgebung installiert. Bei Outside-in-Trackingsystemen verhält es sich umgekehrt. Der zur Lagebestimmung eingesetzte Empfänger (Kamera) ist im umgebenden Raum installiert, die Sender (Marker) sind an dem zu trackenden Objekt angebracht. Optische Trackingsysteme können weiter in das Tracking künstlicher Merkmale, z. B. optischer Messmarken (Markertracking), und das Tracking natürlicher im Bild vorhandener Merkmale (markerloses Tracking) unterteilt werden. Künstliche Marker kommen in verschiedenen Ausprägungen zum Einsatz. So existieren entsprechend Abbildung 2.7 beispielsweise Systeme mit retroreflektiven Kugeln, die zu einem sogenannten Markerbaum zusammengesetzt sind, oder mit Flach- bzw. Quadratmarkern, welche sich auch zu Würfeln kombinieren lassen [Tön10] [Sch08].

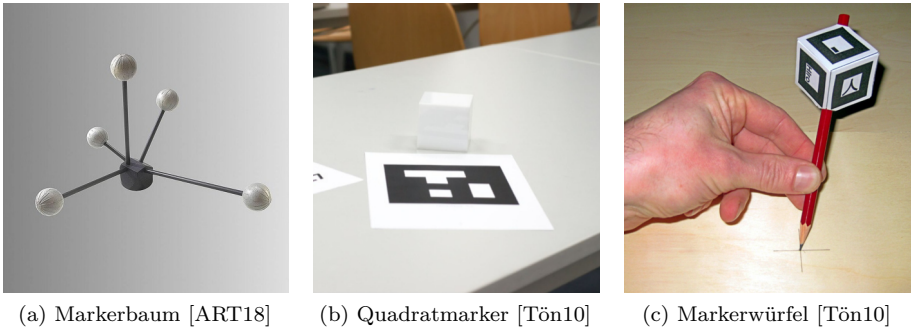


Abbildung 2.7: Markertypen

Die Marker werden im Bild einer Kamera durch Bildverarbeitungsmethoden gesucht. Anhand der im Bild gefundenen Punkte können Korrelationsgleichungen für die Punktbeobachtungen aufgestellt werden, woraus sich die Lage der Kamera gegenüber den Markern berechnen lässt. Beim markerlosen Tracking wird dagegen im Kamerabild nach natürlichen Objekt- oder Umgebungsmerkmalen gesucht, die als natürliche Marken fungieren. Dazu werden verschiedene Methoden der Bildverarbeitung eingesetzt, etwa zur Detektion von Kanten, Ecken, oder Farb- und Kontrastunterschieden [Tön10] [WWS07] [CMP⁺06].

Mechanische Trackingsysteme bestehen aus einer Kette von seriell oder parallel angeordneten beweglichen Gliedern. Die Bewegungen der einzelnen Glied-

der zueinander werden in den Verbindungspunkten durch Sensoren gemessen [Sch08]. Es werden Systeme mit Seilzügen, mit Dreh- und Rotationseinheiten an den Achsen oder roboterartige Messsysteme eingesetzt [Tön10]. Abbildung 2.8(a) zeigt als frühes Beispiel das erste Augmented Reality-System aus dem Jahr 1968 [Sut68]. Es besteht aus einem Head-mounted-Display, dessen Bewegung sowohl mechanisch als auch per Ultraschallsensorik verfolgt wird. Abbildung 2.8(b) zeigt ein modernes und hochgenaues mechanisches Trackingsystem, einen sogenannten Mehrgelenkmessarm. Mehrgelenkmessarme sind Standardinstrumente der industriellen Messtechnik und finden sich häufig im Prototypenbau. Über die Länge der Armsegmente und die Gelenkwinkelstellungen kann die Lage der Messpistole berechnet werden. Zu diesem Zweck befinden sich in den Gelenken hochauflösende optische Inkremental-Drehgeber [Tön10].



(a) Frühes mechanisches Tracking [Sut68]



(b) Mehrgelenkmessarm [FAR17]

Abbildung 2.8: Mechanische Trackingsysteme

Lasertrackingsysteme basieren auf dem Prinzip der Interferometrie. Der Laserstrahl wird über einen Spiegel auf einen retroreflektiven Marker gelenkt. Wird der Marker bewegt, wird der reflektierte Strahl leicht interferometrisch verschoben. Das Signal wird genutzt, um den Spiegel und damit den Laserstrahl der Relativbewegung des Markers folgen zu lassen. Die Spiegelstellung definiert

die Richtung des Laserstrahls durch zwei Winkel. Da das Interferometer ausschließlich Veränderungen detektiert wird die absolute Distanz zum Marker durch Initialisierung der Messung an einem Punkt, von welchem die Distanz zum Marker bereits bekannt ist, berechnet [Ky199].

Inertialtrackingsysteme nutzen Beschleunigungs- und Drehratensensoren zur Lagebestimmung. Beschleunigungssensoren messen die auf eine Masse wirkende Kraft, woraus die Beschleunigung bestimmt werden kann. Aus der Beschleunigung lässt sich die Veränderung der Position berechnen. Drehratensensoren messen die Rotationsgeschwindigkeit eines Körpers. Daraus lässt sich der Winkel ableiten, um den sich ein Körper innerhalb einer bestimmten Zeit gedreht hat. Durch die Kopplung von je drei rechtwinklig angeordneten Beschleunigungs- und Drehratensensoren können alle sechs räumlichen Freiheitsgrade bestimmt werden. Die Systeme haben den Vorteil, dass sie unabhängig von externer Hardware arbeiten und keinen Bezugspunkt benötigen. Dafür kann sich die ermittelte Lage jedoch immer nur auf den Startpunkt beziehen und nicht in einem übergeordneten Koordinatensystem bestimmt werden [Tön10] [Sch08].

Magnetische Trackingsysteme bestehen aus einem stationären Sender und einem oder mehreren beweglichen Empfängern. Der Sender erzeugt aus drei Spulen ein Magnetfeld in den drei Raumrichtungen. Der Empfänger besteht aus drei Magnetfeldsensoren, welche die jeweiligen Feldstärken messen. Daraus wird die Lage des Empfängers relativ zu einem kalibrierten Nullpunkt ermittelt. Magnetische Trackingsysteme haben den Vorteil, dass keine direkte Sichtverbindung zwischen Sender und Empfänger bestehen muss. Als Nachteil ist das Interferenzverhalten gegenüber im Magnetfeld bewegten, metallischen Gegenständen zu nennen [Tön10] [Sch08].

Laufzeitbasierte Trackingsysteme nutzen zur Positionsbestimmung die Signallaufzeit zwischen Sender und Empfänger. Ein bekanntes Beispiel ist das Global Positioning System (GPS). Satelliten im Weltall senden mit Zeitangaben versehene elektromagnetische Signale ihrer Position aus, welche von einem GPS-Empfänger empfangen und ausgewertet werden. Aus den einzelnen Laufzeiten lässt sich die 3D-Position des Empfängers berechnen. GPS-Systeme eignen sich allerdings nur für ein relativ grobes Tracking, ihre Genauigkeit liegt im Meterbereich. Ein weiteres laufzeitbasiertes Trackingverfahren ist das akustische Tracking. Von Lautsprechern oder Aktuatoren werden akustische Signale ausgesandt und durch Mikrofone aufgenommen. Die Position kann dann aus der Laufzeit oder aus der Phasenverschiebung der Signale berechnet werden [Tön10].

Hybride Trackingsysteme kombinieren verschiedene Trackingverfahren und fusionieren daraus die Lageinformationen. So werden in Smartphones für die

Navigation beispielsweise GPS-Sensoren zur globalen Orientierung, eine Triangulation über GSM- und WLAN-Netzwerke zur genaueren Lokalisierung, Magnetsensoren zur Bestimmung der aktuellen Blickrichtung und Beschleunigungssensoren zur weiteren Unterstützung der Lagebestimmung kombiniert.

Eingabegeräte

Unter dem Begriff Eingabegeräte werden sämtliche technologischen Hilfsmittel zur Interaktion mit virtuellen Objekten sowie zur allgemeinen Bedienung des Augmented Reality-Systems zusammengefasst. Dabei können z. B. taktile, optische, Motion Capturing- oder Spracheingabegeräte zum Einsatz kommen [Tön10] [Sch08].

Taktile Eingabegeräte ermöglichen die Interaktion durch manuelle Betätigungen. Darunter fallen bekannte stationäre Eingabegeräte wie Tastatur, Maus, oder Trackball [Sch08]. Eine Sonderform der taktilen Eingabegeräte stellen Touchscreens dar. Sie vereinen Display und Eingabegerät in einem System und können z. B. mit dem Finger oder einem geeigneten Stift bedient werden.

Optische Eingabegeräte können z. B. mithilfe von Markern realisiert werden. Dadurch lässt sich auf einfache Weise ein Knopf bauen: Wird der Marker für einen bestimmten Zeitraum nicht mehr getrackt, etwa weil er durch den Anwender verdeckt wird, kann ein bestimmtes Ereignis ausgelöst werden. Neben der Positionierung von Markern können auch Gesten mit Markern zur Eingabe dienen. Solche Gesten können etwa das Schütteln oder Drehen eines Markers oder beliebige andere Bewegungen sein [Tön10] [Sch08].

Motion Capturing-Eingabegeräte erfassen die Bewegungen des menschlichen Körpers bzw. einzelner Körperteile. So können z. B. Greifbewegungen mit den Fingern, Gesten mit der Hand oder sonstige Bewegungen des Körpers zur Eingabe dienen. Motion Capturing-Eingabegeräte lassen sich in optische und nicht-optische Technologien unterscheiden. Die Bewegung einer Hand lässt sich z. B. sowohl über optische Marker an den einzelnen Fingern als auch über einen Datenhandschuh ermitteln [Tön10].

Spracheingabegeräte sind besonders dann sinnvoll, wenn während der Arbeit mit dem Augmented Reality-System gleichzeitig beide Hände für eine andere Tätigkeit genutzt werden müssen. Je nach Ausführung können sprecherabhängige oder sprecherunabhängige Verfahren zum Einsatz kommen. Sprecherabhängige Spracherkennungsmodule müssen vor der Verwendung vom Benutzer auf die Besonderheiten der eigenen Aussprache trainiert werden. Dafür ist der Wortschatz viel größer als bei sprecherunabhängigen Spracherkennungsmodulen [Tön10] [Sch08].

EDV-Systeme

In einem Augmented Reality-System laufen diverse Datenverarbeitungsprozesse wie z. B. die Berechnung der Trackinginformationen, die Berechnung der darzustellenden virtuellen Inhalte oder die Berechnung der Anwenderinteraktion ab. Hierfür ist ein elektronisches Datenverarbeitungssystem (EDV-System) erforderlich. Datenverarbeitungssysteme bestehen in der Regel aus Hard- und Softwarekomponenten.

EDV-Hardware kann in die drei Kategorien stationär, mobil und hybrid eingeteilt werden [Tüm09]. Stationäre Lösungen, z. B. Desktop-Computer oder Computercluster, sind ortsgebunden. Sie bieten eine hohe Rechenleistung, können aufgrund ihres Gewichts und ihrer Abmessungen aber nicht mobil mitgeführt werden. Mobile Systeme sind z. B. Smartphones, Tabletcomputer oder am Körper getragene Wearables wie etwa Smartwatches. Sie sind zwar mobil einsetzbar, bieten aber im Vergleich zu stationärer Hardware eine geringere Rechenleistung. Hybride Systeme verbinden die Vorteile stationärer und mobiler Systeme miteinander. Das mobile Gerät, z. B. ein Smartphone, kann z. B. zur Interaktion und Darstellung genutzt werden, während rechenaufwendige Operationen im Hintergrund auf einem stationären Computer ausgeführt werden. Für hybride Systeme ist allerdings eine stabile Datenverbindung zwischen mobilem und stationärem Gerät erforderlich.

EDV-Software beschreibt sämtliche Software zum Betrieb eines Augmented Reality-Systems. Darunter fallen z. B. das Betriebssystem des eingesetzten Computers oder die zum Betrieb der Hardware benötigten Treiber, speziell bezogen auf Augmented Reality z. B. die Software zur Berechnung der Trackinginformationen oder zur Berechnung der darzustellenden virtuellen Inhalte.

2.2.3 Registrierung

Für die perspektivisch korrekte Überlagerung von physischen und virtuellen Objekten müssen ihre Koordinatensysteme möglichst genau aufeinander abgebildet werden. Dieser Prozess wird als Registrierung bezeichnet [Tön10]. Die Registrierung, bzw. das Aufeinanderabbilden der Koordinatensysteme von physischen und virtuellen Objekten, kann mathematisch durch Koordinatentransformationen formuliert werden. Der Registrierungsprozess wird am Beispiel eines Video-see-through-Systems in Abbildung 2.9 näher betrachtet.

Zur vollständigen Beschreibung des Registrierungsprozesses muss die Transformation ${}^K T_O$ vom 3D-Koordinatensystem des zu überlagernden physischen

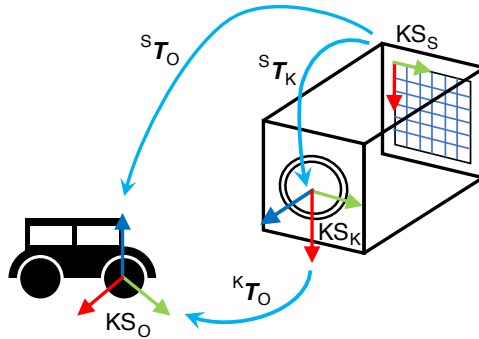


Abbildung 2.9: Intrinsische und extrinsische Transformation

Objektes ins diskrete 2D-Koordinatensystem des Bildsensors bekannt sein. Durch sie ist definiert, auf welche Pixelposition im Sensorkoordinatensystem der Kamera ein bestimmter Punkt aus dem metrischen Koordinatensystem des physischen Objektes abgebildet wird. Mit dieser Information können die virtuellen Objekte perspektivisch korrekt über das Kamerabild gerendert werden. Die gesuchte Transformation ${}^S T_O$ vom Objekt zum Sensor kann durch linksseitiges Multiplizieren der beiden homogenen Transformationsmatrizen ${}^K T_O$ vom Objekt zur Kamera und ${}^S T_K$ von der Kamera zum Sensor ausgedrückt werden:

$${}^S T_O = {}^S T_K {}^K T_O. \quad (2.1)$$

Die Transformation ${}^S T_K$ von der Kamera zum Sensor wird durch den internen Kameraaufbau sowie das eingesetzte Objektiv bestimmt und als Intrinsik bezeichnet. Die Transformation ${}^K T_O$ vom betrachteten Objekt zur Kamera beschreibt die Lage der Kamera gegenüber dem Untersuchungsobjekt und ändert sich mit der Bewegung.

Intrinsik

Die Transformation ${}^S T_K$ beschreibt die Abbildungseigenschaften der Kamera anhand ihrer inneren Geometrie sowie des Sensoraufbaus durch die sogenannten intrinsischen Kameraparameter. Diese Parameter sind bis auf Wärmeausdehnungen, Stoßeinwirkungen etc. konstant und werden im Rahmen einer Kamerakalibrierung ermittelt. Durch die Kamerakalibrierung werden außerdem die sogenannten radialen und tangentialen Verzeichnungparameter des Objektivs

bestimmt, um die durch Linsen verursachten Abbildungsfehler zu kompensieren. Die Korrektur dieser kissen- oder tonnenförmigen Linsenverzeichnungen erfolgt durch eine zusätzliche nichtlineare Transformation der 2D-Sensorkoordinaten. Kamerakalibrierungen können in die drei Kalibrierverfahren Laborkalibrierung, Testfeldkalibrierung und Simultankalibrierung eingeteilt werden. Sie unterscheiden sich durch das verwendete Referenzobjekt sowie durch den Ort und die Zeit der Kalibrierung [Luh10] [Sch05] [Zha99] [God93].

Bei der **Laborkalibrierung** werden die Abbildungseigenschaften einer Kamera messtechnisch im Labor ermittelt. Mithilfe eines Goniometers oder eines Kollimators werden dazu die Richtungen oder Winkel der Bildstrahlen durch das Objektiv der Kamera hindurch gemessen. Durch die spezialisierten Messgeräte sind Laborkalibrierungen allerdings aufwendig und teuer [Luh10].

Bei der **Testfeldkalibrierung** wird ein Kalibrierobjekt mit Merkmalen bekannter Lage eingesetzt, welches mit der Kamera aus verschiedenen Perspektiven abgesehen wird. Dazu kommen sowohl dreidimensionale Körper als auch zweidimensionale Muster zum Einsatz. In den einzelnen Bildern werden die signalisierten Punkte des Testfeldes durch Bildverarbeitungsalgorithmen erkannt. Mit diesen Koordinaten lassen sich verschiedene Beobachtungsgleichungen aufstellen, wodurch die Bestimmung des optimalen Parametersatzes z. B. iterativ durch Minimierung einer entsprechenden Gütefunktion möglich ist [Luh10] [Zha99].

Die **Simultankalibrierung** verwendet ebenfalls ein Testfeld, das hier allerdings gemeinsam mit dem zu vermessenden Objekt aufgenommen wird. Da die Kameraparameter exakt für den Zeitpunkt der Objektaufnahme bestimmt werden, kann durch diesen Ansatz eine höhere Genauigkeit als mit der zeitversetzten Testfeldkalibrierung erreicht werden [Luh10].

Extrinsik

Die Transformation ${}^K T_O$ beschreibt die Lage der Kamera gegenüber dem zu überlagernden physischen Objekt durch sechs sogenannte extrinsische Parameter (Translation und Rotation in allen drei Raumrichtungen) und ändert sich mit der Bewegung. Sie wird mithilfe eines Trackingsystems dynamisch zur Laufzeit bestimmt [Tön10]. Abschnitt 3.3 stellt einige Trackingsysteme näher vor und beschreibt die jeweils notwendigen Schritte zur Ermittlung der extrinsischen Parameter im Detail.

2.2.4 Anwendungen

Ebenso vielfältig wie die Systemkonstellationen sind die Anwendungsbereiche von Augmented Reality. Dieser Abschnitt gibt einen allgemeinen Überblick bereits existierender Anwendungen, ohne Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben. Die vorgestellten Anwendungen sind größtenteils (Forschungs-)Prototypen und nicht produktiv etabliert.

Navigation und Orientierung

Augmented Reality kann zur Navigation und Orientierung in der Realität genutzt werden. Ein einfaches Beispiel für visuelle Navigationsanweisungen mittels Augmented Reality z. B. auf einem Head-up-Display im Fahrzeug zeigt Abbildung 2.10(a). Anhand der lagerichtigen Visualisierung des virtuellen Navigationspfeils in der realen Umgebung weiß der Fahrer schnell, wo er abbiegen muss, ohne den Blick von der Straße abzuwenden. Abbildung 2.10(b) zeigt ein Beispiel für Augmented Reality im Fahrzeug zur frühzeitigen Erkennung und Visualisierung von Gefahrenquellen. So können Fußgänger schon bevor sie im Kegel des Abblendlichtes auftauchen durch Infrarotkameras erkannt und z. B. mit einer virtuellen Umrandung hervorgehoben werden [Tön10] [Ber08] [TKK08].



(a) Virtueller Navigationspfeil auf realer Straße [Kle08]



(b) Virtuell hervorgehobene Fußgänger [Ber08]

Abbildung 2.10: Augmented Reality zur Navigation und Orientierung

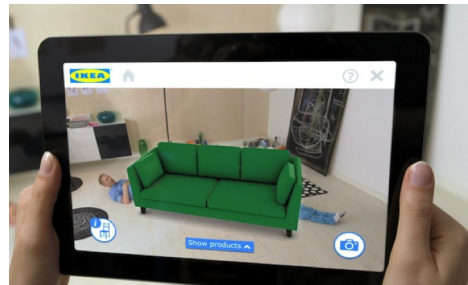
Zwar bieten Anwendungen zur Navigation und Orientierung über Head-up-Displays im Fahrzeug großes Potenzial, technische Herausforderungen bezüglich der Displaytechnologie und ungelöste rechtliche Fragestellungen verhindern jedoch bisher einen breiteren Einsatz.

Unterhaltung und Marketing

Auch im Unterhaltungsbereich werden die Möglichkeiten von Augmented Reality untersucht. Ein Beispiel ist der Ego-Shooter ARQuake [TCD⁺02], eine Augmented Reality-Erweiterung des bekannten Spiels Quake. Abbildung 2.11(a) zeigt eine Szene aus dem Spiel. Der Spieler trägt ein Head-mounted-Display, das Tracking wird über GPS und optische Marker realisiert. Aufgabe des Spielers ist es nun, die Angriffe der virtuellen Gegner durch den Einsatz virtueller Waffen abzuwehren. Abbildung 2.11(b) zeigt ein verbreitetes Beispiel für Augmented Reality aus dem Marketingbereich. Potenzielle Kunden können sich virtuelle Möbelstücke zu Hause im realen Umfeld mit einem Smartphone oder einem Tabletcomputer anschauen [IKE17]. Die Möbel können über einen Marker beliebig platziert werden. So kann einerseits das subjektive Gefallen an verschiedenen Stellen in der Wohnung beurteilt werden, aber auch eventuelle räumliche Engstellen lassen sich auf diese Weise einfach finden.



(a) ARQuake [PT02]



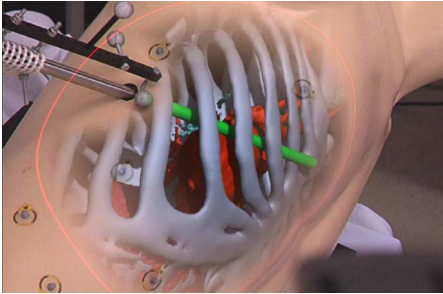
(b) AR im Marketing [IKE17]

Abbildung 2.11: Augmented Reality in Unterhaltung und Marketing

Unterstützung komplexer Arbeitsprozesse

Augmented Reality kann in vielen Bereichen zur Unterstützung komplexer Arbeitsprozesse genutzt werden. Abbildung 2.12(a) zeigt ein Beispiel aus der Medizin. Hier können einem Chirurgen z. B. computertomografisch oder röntgentechnisch generierte Bilddaten direkt auf dem Körper des Patienten visualisiert werden, um einen minimalinvasiven Eingriff zu erleichtern. Der Chirurg weiß durch die Visualisierung genau, an welcher Stelle und in welche Richtung das Operationsinstrument angesetzt werden muss [BWH⁺07]. Abbildung 2.12(b)

zeigt ein Beispiel für Augmented Reality aus dem Service. Dabei kann beispielsweise die korrekte Lage eines zu montierenden Bauteils, das für einen Arbeitsschritt benötigte Werkzeug oder die Montagereihenfolge am realen Objekt visualisiert werden. Gerade bei der erstmaligen Montage eines neuen Produktes, seltenen exotischen Varianten oder umfangreichen Prozessschritten kann diese Unterstützung hilfreich sein [SDW⁺14] [WBE⁺13].



(a) AR in der Medizin [BWH⁺07]



(b) AR im Service [SDW⁺14]

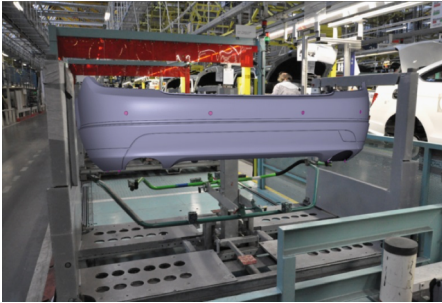
Abbildung 2.12: Augmented Reality zur Unterstützung komplexer Arbeitsprozesse

Augmented Reality-Systeme zur Unterstützung komplexer Arbeitsprozesse sind in der Praxis noch nicht weit verbreitet. Da diese Aufgaben in der Regel freie Hände benötigen, werden häufig Head-mounted-Displays eingesetzt. Offene Fragestellungen betreffen etwa deren Gewicht, Auflösung und Betriebsdauer. Zudem müssen die komplexen Wartungs- und Serviceanleitungen häufig manuell erstellt werden, was den Aufwand für einen Augmented Reality-Einsatz zu Anfang deutlich erhöht.

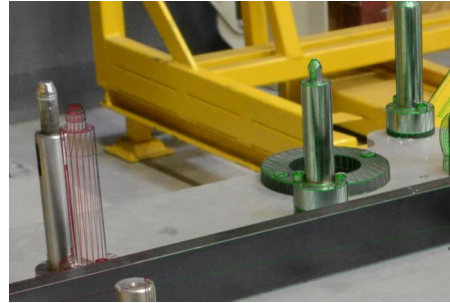
Geometrische Analysen

Augmented Reality kann in der Produktentstehung zur geometrischen Beurteilung virtueller Konstruktionsdaten im Kontext eines realen Umfeldes genutzt werden. Abbildung 2.13(a) zeigt als Beispiel die Überlagerung einer virtuellen Stoßstange auf einem physischen Ladungsträger. Die Aufnahmepunkte der virtuellen Stoßstange können im physischen Ladungsträger überprüft werden, ohne dass die Stoßstange bereits in Hardware existieren muss. Da sich auf diese Weise viele geometrische Fragestellungen beurteilen lassen, kann häufig auf die kosten- und zeitintensive Herstellung realer Prototypenteile verzichtet werden. Auch zur Beurteilung der Fertigungs- und Montagequalität kann Augmented

Reality genutzt werden. Abbildung 2.13(b) zeigt ein Beispiel, in dem die virtuellen Konstruktionsvorgaben von Absteckern eines Betriebsmittels in Form von Drahtgittermodellen auf ihr physisches Gegenstück überlagert wurden. Durch die verschoben dargestellte Überlagerung wird klar, dass der Abstecker links im Bild an einer falschen Position montiert ist.



(a) Konzeptuntersuchung



(b) Soll-Ist-Abgleich

Abbildung 2.13: Augmented Reality für geometrische Analysen

Augmented Reality-Systemen zur Beurteilung virtueller Entwicklungsdaten im physischen Umfeld wird in vielen Forschungsarbeiten großes Potenzial zugesprochen [Gei12] [Bad12] [Pen09] [Sch08] [Nöl06], trotzdem konnten sie sich weitestgehend noch nicht in der produktiven Anwendung etablieren. In diesem Zusammenhang soll im Folgenden näher auf die Gebrauchstauglichkeit eingegangen werden, welche als Maß für eine effektive, effiziente, und zufriedenstellende Nutzung interaktiver Systeme dient.

2.3 Gebrauchstauglichkeit

Die folgenden Abschnitte geben eine kurze Einführung in das Konzept der Gebrauchstauglichkeit. Auf Basis einer Begriffsdefinition werden die einzelnen Komponenten sowie die Maße der Gebrauchstauglichkeit näher betrachtet. Anschließend werden der menschenzentrierte Gestaltungsprozess zur Entwicklung gebrauchstauglicher Systeme sowie die System Usability Scale zur einfachen Bestimmung der Gebrauchstauglichkeit vorgestellt.

2.3.1 Komponenten der Gebrauchstauglichkeit

Um die Eignung eines Produktes, Systems oder Dienstes für einen bestimmten Verwendungszweck zu spezifizieren oder zu bewerten, kann die Gebrauchstauglichkeit herangezogen werden. DIN EN ISO 9241-11 definiert Gebrauchstauglichkeit als „Das Ausmaß, in dem ein Produkt durch bestimmte Benutzer in einem bestimmten Nutzungskontext genutzt werden kann, um bestimmte Ziele effektiv, effizient und zufriedenstellend zu erreichen“ [DIN99]. Abbildung 2.14 zeigt die einzelnen Komponenten der Gebrauchstauglichkeit und ihren Zusammenhang im Überblick.

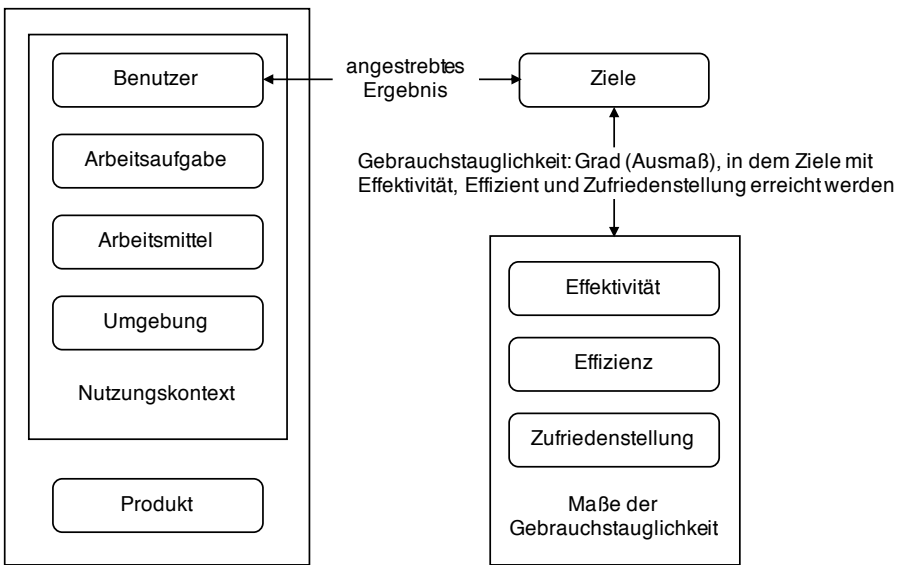


Abbildung 2.14: Komponenten der Gebrauchstauglichkeit [DIN99]

Das **Ziel** ist das bei der Produktnutzung angestrebte Arbeitsergebnis. Die übergeordneten Ziele können weiter in Teilziele zerlegt werden, welche die Komponenten der übergeordneten Ziele sowie die Kriterien der Zielerreichung definieren. Das Niveau, auf welchem das übergeordnete Ziel definiert wird, hängt von den Grenzen des Arbeitssystems ab und ergibt sich durch den Nutzungskontext [DIN99].

Der **Nutzungskontext** ist charakterisiert durch die Benutzer, welche das Produkt einsetzen, die mithilfe des Produktes zu erfüllende Arbeitsaufgabe, die

Arbeitsmittel sowie die Umgebung, in welcher das Produkt genutzt wird. Die Beschreibung des Nutzungskontextes kann als Basis für den Entwurf und die Evaluierung der Interaktion zwischen Benutzer und Produkt dienen [DIN99].

Die **Benutzer** sind charakterisiert durch ihre Kenntnisse, Fertigkeiten, Erfahrungen, Ausbildung, ihren Übungsgrad sowie durch physische Merkmale wie motorische und sensorische Fähigkeiten. Benutzer können in verschiedene Rollen aufgeteilt werden, die z. B. unterschiedliche Fertigkeiten oder einen unterschiedlichen Erfahrungsgrad voraussetzen [DIN99].

Die **Arbeitsaufgaben** beschreiben die zur Zielerreichung notwendigen Aktivitäten. Beeinflussen Aufgabenmerkmale wie etwa Dauer oder Häufigkeit die Gebrauchstauglichkeit, sind diese ebenfalls als Teil des Nutzungskontextes zu verstehen [DIN99].

Die **Arbeitsmittel** umfassen die zu einem Produkt gehörende Hardware und Software sowie alle sonstigen Materialien, die mit der Produktnutzung zusammenhängen. Die Arbeitsmittel können als Menge von Systemkomponenten beschrieben werden, von denen für eine oder mehrere die Gebrauchstauglichkeit evaluiert oder spezifiziert werden soll, oder als Menge von Attributen oder Verhaltensmerkmalen der Komponenten [DIN99].

Die **Umgebung** beschreibt das technische Umfeld des Produktes, wie z. B. Netzwerke oder Software, die physische Umgebung, wie z. B. den Arbeitsplatz oder die Ausstattung, die Umgebungsbedingungen wie z. B. Temperatur, Beleuchtung oder relative Luftfeuchtigkeit sowie die soziale bzw. kulturelle Umgebung, z. B. die Arbeitspraxis oder die Organisationsstruktur [DIN99].

Die Komponenten der Gebrauchstauglichkeit werden durch den Anwendungsfall definiert. Die Gebrauchstauglichkeit kann anhand der drei Maße Effektivität, Effizienz und Zufriedenstellung bewertet werden.

2.3.2 Maße der Gebrauchstauglichkeit

Für die Auswahl und Kombination der Maße der Gebrauchstauglichkeit gibt es keine allgemeingültige Regel, da die Bedeutung der Komponenten stark vom Nutzungskontext und vom Nutzungsziel abhängt. Können keine objektiven Maße gewonnen werden, kann auch auf subjektive Maße, welche auf Einschätzungen der Benutzer basieren, zurückgegriffen werden [DIN99].

Effektivität wird definiert als „Die Genauigkeit und Vollständigkeit, mit der Benutzer ein Ziel erreichen“ [DIN99]. Effektivität beschreibt damit das Verhältnis zwischen einem tatsächlichen Ergebnis und einem festgelegtem Ziel. Die Effektivität kann als prozentualer Wert ausgedrückt werden:

$$\text{Effektivität} = \frac{\text{Ergebnis}}{\text{Ziel}} \quad (2.2)$$

Effizienz wird definiert als als „Der im Verhältnis zur Genauigkeit und Vollständigkeit eingesetzte Aufwand, mit dem Benutzer ein bestimmtes Ziel erreichen“ [DIN99]. Der Aufwand kann z. B. die physische oder psychische Beanspruchung, Zeit, Material oder Kosten beinhalten. Die Effizienz setzt also das Ergebnis ins Verhältnis zu diesem eingesetzten Ressourcenaufwand:

$$\text{Effizienz} = \frac{\text{Ergebnis}}{\text{Aufwand}} \quad (2.3)$$

Zufriedenstellung wird definiert als „Freiheit von Beeinträchtigungen und positive Einstellung gegenüber der Nutzung eines Produkts“ [DIN99]. Die Zufriedenstellung beschreibt damit die subjektive Reaktion eines Nutzers auf ein Produkt. Sie kann subjektiv oder objektiv gemessen werden. Bei einer objektiven Messung kann z. B. das Nutzerverhalten beobachtet und bezüglich physischer oder physiologischer Reaktionen dokumentiert werden. Bei einer subjektiven Messung hingegen kann ein zahlenmäßiges Erfassen der Intensität der vom Benutzer subjektiv geäußerten Reaktionen erfolgen. Dies kann z. B. durch persönliche Befragungen geschehen, oder durch einen Fragebogen mit Einstellungsskalen [DIN99].

2.3.3 Der menschenzentrierte Gestaltungsprozess

DIN EN ISO 9241-210 beschreibt mit dem menschenzentrierten Gestaltungsprozess eine Vorgehensweise zur Entwicklung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme [DIN11]. Durch die Konzentration auf den Benutzer sowie seine Anforderungen und Bedürfnisse soll der Ansatz Effektivität, Effizienz und Zufriedenstellung und damit die Gebrauchstauglichkeit eines zu entwickelnden Produktes insgesamt erhöhen. Der Ansatz ergänzt bestehende Gestaltungskonzepte und kann etwa in die objektorientierte, die Wasserfall- oder die agile Entwicklung von interaktiven Systemen eingebunden werden. Der menschenzentrierte Gestaltungsprozess ist stark iterativ geprägt, da die Anforderungen, die in der Anfangsphase eines

Projekts erfasst werden, in der Regel nicht erschöpfend sind und sich einige Anforderungen erst dann zeigen, wenn erste Lösungsvorschläge vorliegen und evaluiert wurden. Abbildung 2.15 stellt die Phasen des menschenzentrierten Gestaltungsprozesses dar.

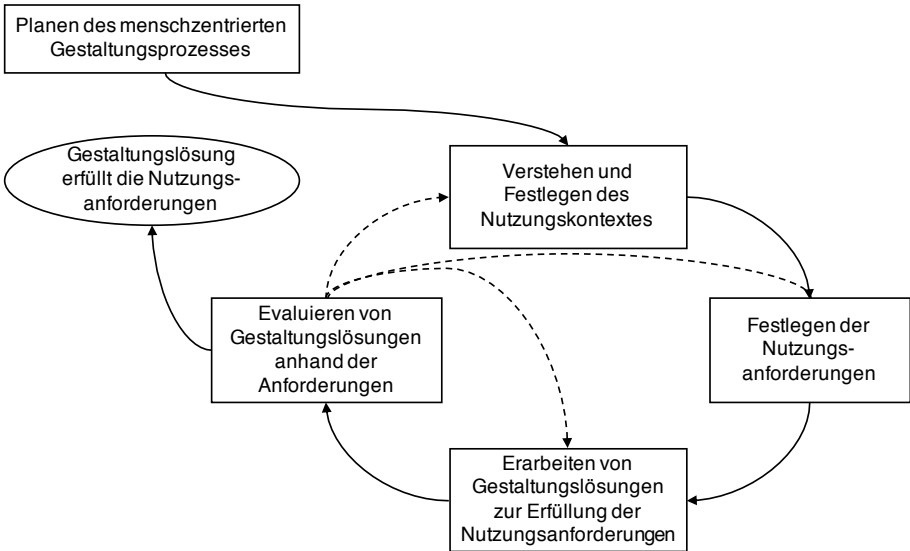


Abbildung 2.15: Menschenzentrierter Gestaltungsprozess [DIN11]

Nachdem die Entscheidung zum Einsatz des menschenzentrierten Gestaltungsprozesses getroffen und dieser dem Projekt entsprechend geplant wurde, beginnen die Gestaltungsaktivitäten. Zunächst muss der Nutzungskontext inklusive der Ziele und Arbeitsaufgaben, der Benutzer mit ihren Eigenschaften sowie der Umgebung, in der das System eingesetzt werden soll, verstanden und beschrieben werden. Auf dieser Basis lassen sich die funktionalen und nicht-funktionalen Nutzungsanforderungen an das Produkt festlegen. Mithilfe der Nutzungsanforderungen werden mögliche Gestaltungslösungen entwickelt. Im frühen Stadium ist dazu der Einsatz von Szenarien, Simulationen, Modellen und sonstigen Prototypen sinnvoll, um alternative Gestaltungslösungen schnell überprüfen zu können. Die Gestaltungslösungen werden schließlich anhand der Anforderungen evaluiert um Rückmeldungen über die Stärken und Schwächen aus Benutzersicht zu erhalten und die Gestaltungslösung anschließend wieder im iterativen Prozess verbessern zu können. Der menschenzentrierte Gestaltungsprozess ist abgeschlossen, wenn die Gestaltungslösung die Nutzungsanforderungen erfüllt [DIN11].

2.3.4 System Usability Scale

Gebrauchstauglichkeit in einem absoluten Sinn existiert nicht, sie kann immer nur in Bezug auf einen konkreten Nutzungskontext definiert und bewertet werden. Eine Herausforderung besteht darin, die Gebrauchstauglichkeit zu quantifizieren und über mehrere Systeme und Einsatzbereiche hinweg vergleichbar zu machen. Die technologisch unabhängige System Usability Scale (SUS) bietet hierfür einen generalisierten Ansatz, der auf dem subjektiven Benutzerempfinden beruht. Die SUS ermöglicht die schnelle und einfache Bewertung der globalen Gebrauchstauglichkeit von Produkten oder Dienstleistungen anhand von zehn Fragen, die durch die Nutzer auf einer Likert-Skala bewertet werden. Abbildung 2.16 zeigt ein Beispiel für einen solchen Fragebogen [Bro96].

	stimme gar nicht zu				stimme voll zu
1. Ich kann mir sehr gut vorstellen, das System regelmäßig zu nutzen.					
2. Ich finde, dass das System unnötig kompliziert ist.					
3. Ich finde, dass das System ist einfach bedienbar ist.					
4. Ich denke, dass ich Unterstützung benötigen würde, um das System nutzen zu können.					
5. Ich finde, dass die verschiedenen Funktionen des Systems gut integriert sind.					
6. Ich finde, dass es im System zu viele Inkonsistenzen gibt.					
7. Ich kann mir vorstellen, dass die meisten Menschen das System schnell beherrschen werden.					
8. Ich finde, dass die Bedienung des Systems sehr umständlich ist.					
9. Ich habe mich bei der Nutzung des Systems sehr sicher gefühlt.					
10. Ich musste einiges lernen, bevor ich mit dem System arbeiten konnte.					

Abbildung 2.16: Fragebogen zur Ermittlung der SUS-Punktzahl, in Anlehnung an [Bro96]

Zur Ermittlung der SUS-Punktzahl werden die Punkte je Frage aufsummiert. Damit die Aussagen der Probanden über das System möglichst aussagekräftig sind wurden die Fragen so gewählt, dass positive und negative Antwortmöglichkeiten wechseln. Abhängig von der Stärke der Zustimmung oder Ablehnung werden die Antwortmöglichkeiten mit den Punkten 0 bis 4 bewertet. Bei den ungeraden Positionen (1, 3, 5, 7, 9) entspricht die Antwort *stimme voll zu* der Punktzahl 4, bei den geraden Positionen (2, 4, 6, 8, 10) der Punktzahl 0. Umgekehrt entspricht bei den ungeraden Positionen die Antwort *stimme gar nicht zu* der Punktzahl 0, bei den geraden Positionen der Punktzahl 4. Die ermittelte Punktzahl wird mit dem Faktor 2,5 multipliziert, das Ergebnis ist die SUS-Punktzahl. Sie kann einen Wert zwischen 0 und 100 annehmen, wobei 0 die schlechteste und 100 die beste Bewertung darstellt [Bro96].

Die SUS-Punktzahl kann zwar Werte zwischen 0 und 100 annehmen, darf allerdings nicht als prozentuale Angabe der Gebrauchstauglichkeit missverstanden werden. Empirische Untersuchungen zeigten, dass z. B. eine Bewertung von 80 Punkten nicht doppelt so gut wie eine Bewertung von 40 Punkten ist. Zur näheren Erläuterung wird Abbildung 2.17 betrachtet. Die SUS-Punktzahl kann demnach z. B. in Schulnoten umgerechnet werden. So entspricht eine SUS-Punktzahl zwischen 100 und 90 der amerikanischen Schulnote A (im deutschen System der sehr guten Note 1), bis 80 Punkte der Note B (der guten Note 2), bis 70 Punkte der Note C (der befriedigenden Note 3), bis 60 Punkte der Note D (der ausreichenden Note 4) und unterhalb von 60 Punkten der Note F (der mangelhaften Note 5 und der ungenügenden Note 6) [BMK09] [BKM08].

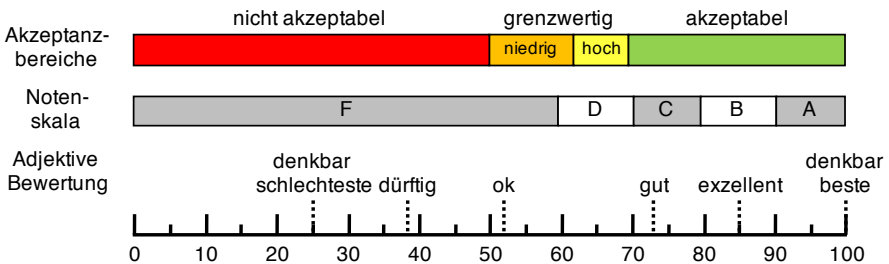


Abbildung 2.17: Interpretation der SUS-Punktzahl, in Anlehnung an [BKM08]

Mit der System Usability Scale steht ein einfaches und erprobtes Mittel zur globalen Bewertung der Gebrauchstauglichkeit interaktiver Systeme zur Verfügung. Die SUS-Punktzahl ermöglicht allerdings nur die Aussage ob und in welchem Grad Nutzerprobleme bestehen. Sie kann jedoch keine Auskunft darüber geben,

welche Schwierigkeiten konkret vorliegen. Daher wird die SUS in Usability-Tests häufig mit Fragebögen, Interviews, lautem Denken und Beobachtungen der Probanden kombiniert [RF13] [RCS11] [BKM08] [DR99].

2.4 Zusammenfassung

Der Produktentstehungsprozess beschreibt den Lebenslauf eines neuen Produktes von der ersten Produktidee bis hin zur Produktion in Fabriken. Produkt und Produktionssystem werden zunächst als virtuelle Prototypen am Computer geplant und entwickelt. Basis für einen virtuellen Prototyp ist ein in einem CAD-Programm dreidimensional konstruiertes geometrisches Modell. Sobald dieses Modell einen definierten Reifegrad erreicht hat, dient es als Vorgabe für den Aufbau der physischen Prototypen. Ab diesem Zeitpunkt laufen die virtuelle und die physische Produkt- und Produktionssystementwicklung parallel zueinander, die jeweiligen Erkenntnisse werden zu bestimmten Zeitpunkten im Produktentstehungsprozess synchronisiert.

Augmented Reality beschreibt die Erweiterung der menschlichen Sinneswahrnehmung der physischen Realität durch zusätzliche virtuelle Inhalte. Visuelle Augmented Reality-Systeme bestehen aus den Komponenten Trackingsystem, Visualisierungssystem, Eingabegerät und EDV-System. Für die Überlagerung von physischen und virtuellen Objekten müssen ihre Koordinatensysteme aufeinander abgebildet werden. Dieser Prozess wird als Registrierung bezeichnet und kann durch Koordinatentransformationen ausgedrückt werden. Im Produktentstehungsprozess kann Augmented Reality zur Analyse geometrischer Problemstellungen eingesetzt werden. Das Potenzial besteht in der Möglichkeit, physische und virtuelle Konzeptions-, Entwicklungs- und Absicherungsaktivitäten zu jedem Zeitpunkt im Produktentstehungsprozess synchronisieren und gegenseitig ergänzen zu können.

Gebrauchstauglichkeit beschreibt die Eigenschaft eines Produktes, durch bestimmte Benutzer und in einem bestimmten Nutzungskontext effektiv, effizient und zufriedenstellend eingesetzt werden zu können. Zur Entwicklung eines gebrauchstauglichen Produktes kann der menschenzentrierte Gestaltungsprozess eingesetzt werden. Das stark iterative Vorgehen profitiert von einer frühzeitigen und umfassenden Einbindung der späteren Anwender in die verschiedenen Entwicklungsaktivitäten. Zur Quantifizierung der Gebrauchstauglichkeit steht mit der System Usability Scale ein ebenso einfaches wie erprobtes Werkzeug zur Verfügung.

3 Stand der Technik

Dieses Kapitel fasst den Stand der Technik von Augmented Reality zur Bewertung geometrischer Problemstellungen im Produktentstehungsprozess zusammen. Hierfür sollen zunächst technisch unabhängig die aus der Literatur bekannten Anwendungen vorgestellt werden. Nach einer kurzen Betrachtung der für Augmented Reality-Analysen eingesetzten Untersuchungswerkzeuge werden vier typische Beispielsysteme analysiert. Auf Basis einer Einschätzung der Handlungsbedarfe wird schließlich eine Forschungshypothese zur Nutzbarmachung von Augmented Reality in der Produktentstehung formuliert.

3.1 Anwendungen

Mithilfe der Technologie Augmented Reality lassen sich unter anderem viele geometrische Problemstellungen aus dem Ingenieursalltag lösen. Durch die lage-richtige Einblendung virtueller Objekte in ein reales Umfeld bietet Augmented Reality das Potenzial, physische und virtuelle Planungs- und Entwicklungsaktivitäten zu beliebigen Zeitpunkten im Produktentstehungsprozess miteinander abzugleichen und zu synchronisieren [Gei12].

3.1.1 Abgrenzung

Augmented Reality kann in der Produktentstehung für unterschiedlichste Anwendungen eingesetzt werden (vgl. Abschnitt 2.2.4). Den Schwerpunkt dieser Arbeit bilden geometrische Analysen des Zusammenspiels von physischen und virtuellen Objekten in der Produkt- und der Produktionssystementwicklung. Um die Vielfalt an Anwendungsmöglichkeiten greifbar zu machen, werden die Anwendungen in dieser Arbeit in die beiden Kategorien Umfeldanalyse und Qualitätsanalyse eingeteilt.

Bei einer Umfeldanalyse wird das physische Umfeld, zum Beispiel das Produkt, ein Betriebsmittel, oder eine Fertigungsstation, durch zusätzliche virtuelle Objekte, welche real nicht vorhanden sind, ergänzt. Abbildung 3.1(a) verdeutlicht dies am Beispiel einer realen Fahrzeugkarosserie, welche mit einem virtuellen Motor überlagert wurde. Dadurch kann das Zusammenspiel von realen und virtuellen Umfängen z. B. bezüglich Störkonturen, Zugänglichkeit, oder Befestigungspunkten durch den Anwender visuell beurteilt werden. Bei einer Qualitätsanalyse wird hingegen ein physisches Objekt mit seinen korrespondierenden 3D-Konstruktionsdaten überlagert. Abbildung 3.1(b) zeigt dazu eine reale Karosserie, die mit einer virtuellen Konturdarstellung ihrer Körperkanten ergänzt wurde. Anhand der Überdeckung lässt sich die Fertigungsqualität der physischen Karosserie bezogen auf die virtuellen CAD-Vorgaben visuell beurteilen.

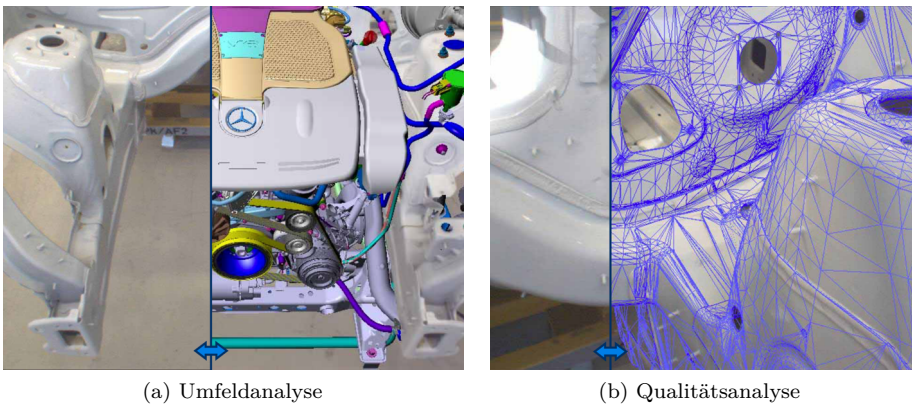
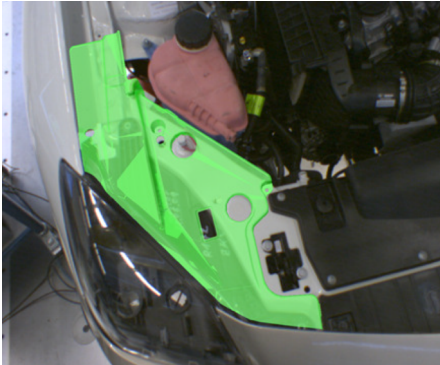


Abbildung 3.1: Umfeld- und Qualitätsanalyse [Kat12]

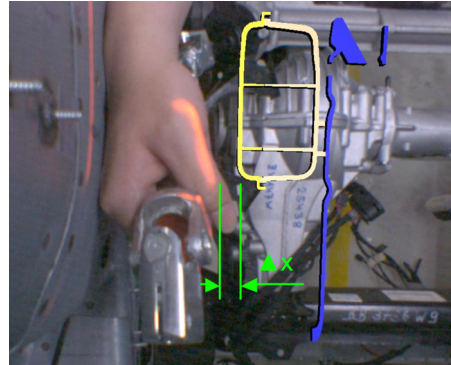
3.1.2 Umfeldanalyse

Die Umfeldanalyse mittels Augmented Reality verspricht besonders in der Konzeptphase großes Potenzial. Abbildung 3.2(a) zeigt als Beispiel die Überlagerung einer virtuellen Designabdeckung an einer real aufgebauten Fahrzeugkarosserie. Durch die kombinierte Darstellung lassen sich verschiedene Varianten dieser im direkten Sichtfeld des Kunden liegenden Abdeckung sowohl in Bezug auf das Befestigungskonzept als auch bezüglich der gestalterischen Anmutung schnell und einfach überprüfen. Die kosten- und zeitintensive Herstellung von Prototypen

verschiedener Varianten der Designabdeckung in Hardware ist dadurch nicht mehr notwendig [Kat12] [Gei12]. Auch die Analyse von Störkonturen zwischen realen und virtuellen Objekten ist möglich. Abbildung 3.2(b) zeigt als Beispiel die Überprüfung der Zugänglichkeit eines Anschraubpunktes im Motorraum. Ein Werker führt das physische Werkzeug an den Schraubpunkt der physischen Karosserie, die Störkontur der virtuellen Bauteilkonzepte ist als Schnittgeometrie überlagert. Der Montage- und Demontageprozess kann dadurch frühzeitig für verschiedene virtuelle Varianten abgesichert werden, ohne dass das den Montageraum beschränkende Umfeld bereits vollständig in Hardware existieren muss. Ohne Augmented Reality könnte die Absicherung erst zu einem deutlich späteren Zeitpunkt mit dem Aufbau eines vollständigen physischen Prototypen mit entsprechenden Motoren stattfinden [Gei12] [Kat12].



(a) Anbindungspunkte [Kat12]

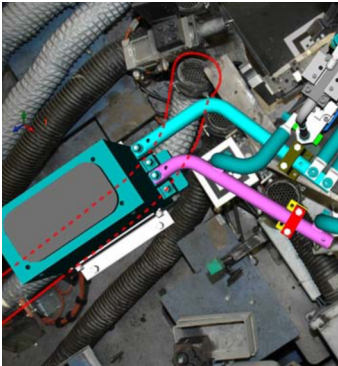


(b) Zugänglichkeit [Gei12]

Abbildung 3.2: Umfeldanalyse Produkt

Die Störkonturenanalyse mittels Augmented Reality wird auch im Bereich der Betriebsmittelplanung eingesetzt. Abbildung 3.3(a) zeigt ein Betriebsmittel, welches für eine neue Baureihe ertüchtigt werden soll, jedoch nicht vollständig als virtuelles Modell dokumentiert ist. Beim Überlagern der aktualisierten virtuellen Konstruktionsdaten auf das physische Betriebsmittel kann eine Kollision zwischen einem physisch vorhandenen, jedoch virtuell nicht abgebildeten Abgasrohr festgestellt werden. Der Planungsfehler fällt durch den Augmented Reality-Einsatz bereits vor Beginn der Umbaumaßnahmen am Betriebsmittel auf und lässt sich so im Vorfeld konstruktiv bereinigen. Abbildung 3.3(b) zeigt ein weiteres Beispiel der Störkonturenanalyse, diesmal aus dem Bereich der Fabrikplanung. Hier soll ein neues, größeres Fahrzeug in ein bestehendes Pro-

duktionssystem integriert werden. Mithilfe von Augmented Reality wird das virtuelle Fahrzeug vorab in der physischen Zielumgebung visualisiert. Dadurch können Engstellen und Kollisionen mit dem Hallenumfeld lange vor dem Aufbau der ersten physischen Prototypen erkannt werden [Pen09].



(a) Betriebsmittel



(b) Fabrikhalle

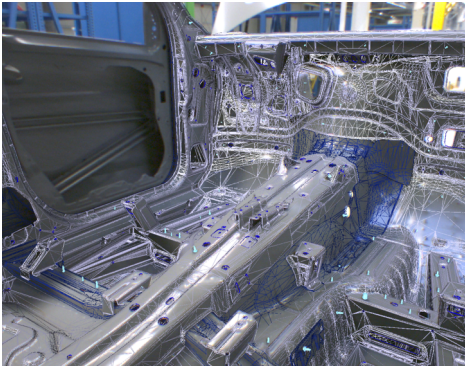
Abbildung 3.3: Umfeldanalyse Produktionssystem [Pen09]

3.1.3 Qualitätsanalyse

Um die geometrische Qualität von physischen oder virtuellen Planungs- und Entwicklungsdaten zu beurteilen, können durch Augmented Reality reale Modelle mit ihren korrespondierenden virtuellen Modellen überlagert werden. Solche Qualitätsanalysen werden auch als Soll-Ist-Abgleiche bezeichnet. Das Soll gibt die Referenz vor, gegen welches das Ist abgeglichen wird. Das Soll kann entweder durch die virtuellen Modelle definiert werden, dann wird die Qualität der physischen Modelle überprüft. Andererseits kann das Soll auch durch die physischen Modelle vorgegeben werden, dann wird die Qualität der virtuellen Modelle kontrolliert.

Abbildung 3.4(a) zeigt ein Beispiel aus der Produktentwicklung, in welchem der Prototyp einer Rohkarosserie bezüglich der Fertigungsqualität bewertet werden muss. Die virtuellen Modelle werden dazu in Form einer Drahtgitterkontur auf die physische Karosserie gelegt [Gei12] [Nöl06]. Die Überlagerung mit den Konstruktionsdaten ermöglicht einen einfachen und intuitiven visuellen

Abgleich beider Datenstände, sodass eine schnelle Bewertung der Fertigungsqualität möglich ist. Abbildung 3.4(b) zeigt ein Beispiel für die Qualitätsanalyse in der Produktionssystementwicklung. Vor einer Umgestaltung muss hier die Aktualität der vorhandenen virtuellen Konstruktionsdaten geprüft werden. Es ist gut erkennbar, dass das abgebildete physische Ventil gegenüber dem transparent dargestellten virtuellen Modell um 180° verdreht montiert ist. Da die digitalen Daten als Planungsgrundlage für die Umgestaltung dienen, können derartige Abweichungen schnell zu Planungsfehlern führen. Die Qualitätsanalyse mittels Augmented Reality erlaubt hier die frühzeitige Identifikation unterschiedlicher Datenstände noch vor Planungsbeginn, sodass von Anfang an eine hohe Planungsqualität gewährleistet werden kann [Bad12] [GSB⁺07].



(a) Rohkarosserie, überlagert mit Drahtgittermodell [Gei12]



(b) Ventil in einer Fabrik, überlagert mit transparenter Vollgeometrie [GSB⁺07]

Abbildung 3.4: Qualitätsanalyse Produkt und Produktionssystem

3.1.4 Potenziale

Die Anwendungsbeispiele zeigen, dass die Technologie Augmented Reality in der Produktentstehung großes Potenzial zur Verzahnung virtueller und physischer Entwicklungsaktivitäten besitzt. Die positive Wirkung der Umfeld- und der Qualitätsanalyse auf die drei Wettbewerbsfaktoren Qualität, Zeit und Kosten (vgl. Abschnitt 2.1.3) soll noch einmal zusammengefasst werden.

Die Umfeldanalyse ermöglicht die beliebige Kombination virtueller und physischer Umfänge des Produktes sowie des Produktionssystems. Oftmals kann

dadurch auf die Zeit und Kosten bedeutende Herstellung physischer Prototypen verzichtet werden, da sich viele Fragestellungen bereits durch eine Visualisierung der virtuellen Konzepte im physischen Zielumfeld beantworten lassen. Absicherungsaktivitäten können zudem häufig deutlich früher im Prozess durchgeführt werden, da schon die ersten virtuellen Konzepte im Zielumfeld dargestellt und entsprechend optimiert werden können. Die frühzeitige Absicherung und Optimierung spart in späteren Phasen mit einem höheren Detaillierungsgrad aufwendige Anpassungen, wodurch sich ein entsprechender Zeit- und Kostenvorteil für den Gesamtprozess ergibt. Häufig können Absicherungen dabei nicht nur vorgezogen, sondern gerade im Hinblick auf die Variantenkomplexität auch umfassender durchgeführt werden. Mithilfe von Augmented Reality ist es beispielsweise möglich, an einem ersten physischen Prototypen sämtliche virtuellen Varianten eines Bauteils zu visualisieren und etwa bezüglich der Kollisionsfreiheit oder der Zugänglichkeit abzusichern. Die Qualität der Entwicklungsdaten lässt sich so frühzeitig sicherstellen und die Aussagekraft der folgenden Absicherungen entsprechend steigern. Die intuitiv verständliche Darstellung physischer und virtueller Umfänge in einer gemeinsamen Umgebung fördert zudem die fachbereichsübergreifende Kommunikation unter den Projektbeteiligten. Durch die verbesserte Kommunikation können Iterationsschleifen aufgrund von Missverständnissen eingespart und die Ergebnisqualität somit weiter gesteigert werden. Die Umfeldanalyse bietet zudem nicht nur für die Optimierung der Schnittstelle zwischen virtueller und physischer Entwicklung, sondern auch zwischen der Produkt- und der Produktionssystementwicklung großes Potenzial, da z. B. virtuelle Produkte, welche physisch noch nicht existieren, zu jeder Zeit mit den physischen Rahmenbedingungen des Produktionssystems abgeglichen werden können.

Mittels der Qualitätsanalyse können sowohl die Qualität virtueller Bestandsdaten als auch die Fertigungs- und Montagequalität physischer Umfänge jederzeit beurteilt und abgeglichen werden. Durch eine Augmented Reality-Überlagerung lassen sich Abweichungen der Form oder der Lage sowie zusätzliche oder fehlende Bauteile einfach erkennen. Bereits vor Planungsbeginn kann die Qualität und Aktualität der virtuellen CAD-Daten sichergestellt werden, was Planungsfehler aufgrund veralteter oder abweichender Datenstände frühzeitig vermeidet. Auf Basis der virtuellen Entwicklungsdaten aufgebaute physische Umfänge können zudem einfach bezüglich ihrer geometrischen Übereinstimmung mit den virtuellen Vorgaben analysiert werden. Gefundene Abweichungen werden nicht wie mit herkömmlicher Messtechnik in Messprotokollen, sondern intuitiv verständlich durch eine kombinierte Darstellung physischer und virtueller Modelle vermittelt. Dies vereinfacht gerade bei komplexen Aufbauten die Fehlersuche, da sich das

geometrische Zusammenspiel aller Elemente übersichtlich beurteilen lässt und Fehler so schneller eingegrenzt werden können.

Zusammenfassend können durch den Einsatz von Augmented Reality zur geometrischen Analyse in der Produktentstehung die Qualität der Arbeitsergebnisse gesteigert, die für die Entwicklung benötigte Zeit reduziert und die Kosten insgesamt gesenkt werden. Augmented Reality kann dadurch zur umfassenden Optimierung der Wettbewerbsfähigkeit produzierender Unternehmen beitragen.

3.2 Untersuchungswerkzeuge

Um die Beurteilung einer geometrischen Problemstellung durch den Anwender zu unterstützen, werden für Augmented Reality-Analysen abhängig vom konkreten Untersuchungsziel unterschiedliche Untersuchungswerkzeuge eingesetzt. Sie lassen sich weiter in Darstellungs-, Transformations- und Messwerkzeuge unterteilen.

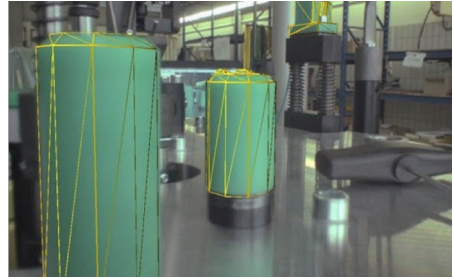
3.2.1 Darstellung

Virtuelle Objekte können auf verschiedene Arten dargestellt werden, welche die visuelle Analyse des geometrischen Zusammenspiels physischer und virtueller Objekte durch den Anwender erleichtern. Abbildung 3.5 zeigt beispielhaft die Volumen-, die Drahtgitter-, die transparente sowie die verdeckende Darstellung.

Die ***Volumendarstellung*** ist die Standarddarstellungsform virtueller Objekte. Die virtuellen Elemente können einzeln ein- und ausgeblendet werden, um den Blick auf die reale Umgebung zu ermöglichen. Volumenkörper können auch als ***Volumenschnitt*** dargestellt werden. Dazu wird eine sogenannte Schnittebene definiert, wobei das virtuelle Objekt lediglich auf einer Seite dieser Ebene dargestellt und auf der anderen ausgeblendet wird. Die ***transparente Darstellung*** ermöglicht die teilweise durchsichtige Darstellung virtueller Objekte, sodass das physische Umfeld sowie dahinterliegende virtuelle Objekte durchscheinen. Auf diese Weise können physische und die virtuelle Objekte gleichzeitig betrachtet und ihr geometrisches Zusammenspiel einfach analysiert werden. Bei der ***Drahtgitterdarstellung*** werden lediglich die Körperkanten der virtuellen Objekte dargestellt. Diese Darstellungsform ist besonders für die Qualitätsanalyse geeignet, da sich hierdurch eventuelle Abweichungen zwischen physischen und



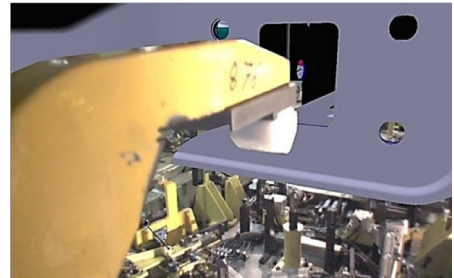
(a) Volumendarstellung einer Fahrzeugkarosserie



(b) Drahtgitterdarstellung von Auflageflächen



(c) Transparente Darstellung eines Scanfeldes



(d) Verdeckende Darstellung eines Niederhalters

Abbildung 3.5: Beispiele für Darstellungsarten virtueller Objekte

virtuellen Körperkanten gut erkennen und beurteilen lassen. Um einen realistischen Tiefeneindruck von physischen und virtuellen Objekten zu erreichen, wird die **verdeckende Darstellung** eingesetzt. Dazu werden physisch vorhandene Objekte mithilfe ihrer zugehörigen CAD-Daten als virtuelle Verdeckungsobjekte definiert. An genau den Stellen im Bild, an denen die Verdeckungsobjekte liegen, werden keine dahinterliegenden virtuellen Elemente dargestellt. Es entsteht der Eindruck, dass die im Hintergrund liegenden virtuellen Objekte durch die im Vordergrund liegenden physischen Objekte verdeckt würden. Eine weitere Variante ist die **eingefärbte Darstellung** virtueller Objekte. Durch Farben können z. B. zu analysierende Umfänge vorab gekennzeichnet oder während einer Analyse identifizierte Abweichungen markiert werden. Die Anpassung der Farbe ist auch immer dann hilfreich, wenn sich die virtuellen Objekte nicht ausreichend vom realen Hintergrund abheben, etwa, weil sie eine ähnliche Farbe und Intensität aufweisen. Dann kann durch die Auswahl einer geeigneten Farbe

ein höherer Kontrast zwischen virtuellen und physischen Objekten hergestellt werden, der die visuelle Beurteilung erleichtert [Bad12] [Nöl06] [NK06].

3.2.2 Transformation

Die Transformation von virtuellen Objekten umfasst im Augmented Reality-Kontext die Translation, die Rotation und die Skalierung. Bei der Translation werden virtuelle Objekte in x -, y - oder z -Richtung verschoben, bei der Rotation um die einzelnen Koordinatenachsen gedreht und bei der Skalierung entlang der Koordinatenachsen gestreckt oder gestaucht. Transformationsfunktionen können auf vielfältige Weise für Augmented Reality-Untersuchungen genutzt werden. So lässt sich z. B. in der Qualitätsanalyse eine zwischen Realität und Virtualität abweichende Bauteillage durch Translations- und Rotationsfunktionen quantifizieren, indem das betroffene virtuelle Modell solange verschoben und gedreht wird, bis die Positionierung mit dem physischen Bauteil übereinstimmt [Bad12]. In der Umfeldanalyse lässt sich durch Translation und Rotation virtueller Umfänge z. B. deren passende Lage in einer physischen Umgebung unter Berücksichtigung aktuell vorhandener physischer Rahmenbedingungen bestimmen.

3.2.3 Vermessung

Zur genaueren Quantifizierung von Abständen lassen sich mit industriellen Augmented Reality-Systemen häufig auch Vermessungen durchführen. Vermessungen können entweder an virtuellen Objekten, durch messtechnische Unterstützung an physischen Objekten, oder auch kombiniert zwischen physischen und virtuellen Objekten durchgeführt werden [Bad12]. Je nach Umsetzung lassen sich Abstände z. B. zwischen Punkten, Linien oder Ebenen vermessen.

3.3 Beispielsysteme

Um die in Abschnitt 3.1 geschilderten Anwendungen durchzuführen, werden verschiedene Konfigurationen von Augmented Reality-Systemen eingesetzt. Während sich die verwendeten Untersuchungswerkzeuge in der Regel kaum voneinander unterscheiden, variieren die Trackingtechnologien der AR-Systeme teils erheblich. Im Folgenden sollen vier Beispielsysteme vorgestellt werden, die bereits im industriellen Einsatz erprobt wurden: Zwei Systeme mit optischem

Markertracking, ein System mit mechanischem Tracking und ein System mit Lasertracking.

3.3.1 Inside-out-Quadratmarkertracking

Das optische Tracking quadratischer Marker nach dem Inside-out-Prinzip wurde bereits in vielen unterschiedlichen industriellen Augmented Reality-Szenarien untersucht. Es wird aufgrund seiner Flexibilität sowohl in der Produktentwicklung [Nöl06] [NK06] als auch in der Betriebsmittel- [Bad12] und Fabrikplanung [Pen09] verwendet. Da kaum spezielle Hardware benötigt wird, ist der Einsatz kostengünstig möglich. Abbildung 3.6 zeigt die einzelnen Komponenten eines Augmented Reality-Systems mit Inside-out-Quadratmarkertracking in einer üblichen Konfiguration. An Hardware sind im einfachsten Fall neben den Markern selbst lediglich eine Foto- oder Videokamera zur Bildaufnahme sowie ein Desktop-Computer oder Laptop zur Berechnung der Trackinginformationen und zur Darstellung der Überlagerung erforderlich. Softwareseitig stehen diverse kommerzielle und frei verfügbare Implementierungen des Markertrackings zur Verfügung, welche ohne großen Aufwand in eigene Anwendungen integriert werden können [GMM⁺14] [WLS08] [WS07] [Fia05] [KB99].



(a) Laptop und Spiegelreflexkamera



(b) Quadratmarker mit Adaptern

Abbildung 3.6: AR-System mit Inside-out-Quadratmarkertracking [Bad12]

Zur Einrichtung des Systems ist zunächst die eingesetzte Videokamera zu kalibrieren (vgl. Abschnitt 2.2.3). Um physische und virtuelle Objekte anschließend

aufeinander abbilden zu können, muss entsprechend Abbildung 3.7 die Transformation ${}^K T_O$ vom untersuchten Objekt zur Kamera bestimmt werden. Sie kann durch linksseitige Multiplikation der Transformationsmatrizen ${}^M T_O$ vom untersuchten Objekt zum Marker und ${}^K T_M$ vom Marker zur Kamera gebildet werden:

$${}^K T_O = {}^K T_M {}^M T_O. \quad (3.1)$$

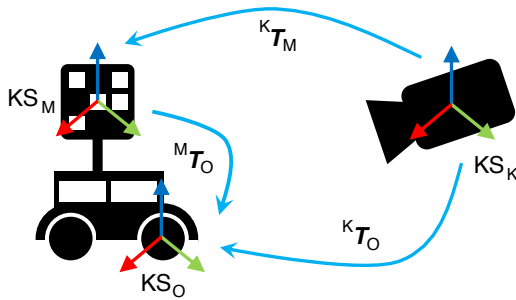


Abbildung 3.7: Prinzipskizze Inside-out-Quadramarkertracking

Die Transformation ${}^K T_M$ vom Marker zur Kamera wird durch das Quadratmarkertracking anhand der Markerbeobachtungen im Kamerabild abgeschätzt. Zur Bestimmung der Transformation ${}^M T_O$ vom Objekt zum Marker werden in der Literatur unterschiedliche Möglichkeiten beschrieben [Pen09]. Eine eher aufwendige und durch die zusätzliche Hardware kostspielige Variante ist es, die Marker mittels eines Koordinatenmessgerätes, etwa eines Mehrgelenkmessarmes, zu vermessen. Eine weiter verbreitete und aufwandsärmere Variante ist das Anbringen der Marker mithilfe geometrischer Adapter, sodass deren Position bzw. Lage im Koordinatensystem des physischen Objektes sofort bekannt ist [Bad12]. Abbildung 3.8 zeigt mit den sogenannten allgemeinen und individuellen Adaptern zwei entsprechende Beispiele. Individuelle Adapter sind speziell für ein konkretes Untersuchungsobjekt angefertigte Negative mit mehr als einem Aufnahme­punkt, wodurch alle sechs Freiheitsgrade schnell und einfach festgelegt werden können. Sie eignen sich besonders für wiederkehrende Untersuchungen an baugleichen Objekten, müssen allerdings für geometrisch unterschiedliche Objekte individuell gefertigt werden. Mithilfe allgemeiner Adapter ist dagegen eine Referenzierung auf wiederkehrende geometrische Elemente wie Ecken, Bohrungen, oder Kanten möglich, die jeweils unterschiedlich viele Freiheitsgrade festlegen können. Die Marker müssen mit einer Kamera abgelichtet werden, die

vollständige Lage (alle sechs Freiheitsgrade) der Marker im Koordinatensystem des Untersuchungsobjektes lässt sich dann über die Aufnahmen abgeschätzten. Zwar ist der Einrichtungsaufwand dadurch höher als bei der Verwendung individueller Adapter, allerdings sind allgemeine Adapter auch deutlich flexibler und lassen sich für unterschiedliche Objekte einsetzen [Bad12].



(a) Allgemeiner Adapter [Pen09]



(b) Individueller Adapter [Bad12]

Abbildung 3.8: Markeradapter

Die mit einem Quadratmarkertracking erreichbare Genauigkeit ist von verschiedenen Faktoren abhängig. Eine wichtige Rolle spielen die Abbildungseigenschaften der verwendeten Kamera, z. B. die Auflösung, das Sensorrauschen und die Güte des Objektivs. Viele Augmented Reality-Systeme mit Quadratmarkertracking setzen dabei gar nicht auf Live-Videokameras, sondern auf digitale Spiegelreflex- oder Systemkameras, mit welchen aufgrund ihrer optischen Stabilität und der häufig sehr guten Abbildungsleistung deutlich genauere Ergebnisse als mit Videokameras erzielt werden können. Weiterhin ist neben der Qualität der Kamerakalibrierung und der Beleuchtungssituation vor allem die im Bild dargestellte Markergröße in Pixeln ausschlaggebend. Um eine gleichbleibende Genauigkeit gewährleisten zu können, sind für einen größeren Arbeitsabstand dementsprechend größere Marker zu wählen. Je nach verwendeter Implementierung des Markertrackings und des restlichen Systemsetups können für die Lagebestimmung bei ausreichender Markergröße im Bild Fehlerwerte von etwa einem Millimeter realisiert werden, allerdings nimmt die Genauigkeit mit zunehmendem Abstand zwischen Marker und Kamera stark ab [NCH⁺10] [Pen09] [PMK06].

Der Arbeitsraum eines Quadratmarkertrackings kann durch die Verwendung

zusätzlicher Marker theoretisch beliebig erweitert werden. Dadurch steigt aber auch der erforderliche Rüstaufwand, da die zusätzlichen Marker ebenfalls auf das Koordinatensystem des Untersuchungsobjektes referenziert werden müssen. Mit wachsendem Arbeitsraum bzw. Arbeitsabstand werden außerdem größere Marker erforderlich, damit die auf dem Bildsensor abgebildete Markerfläche in Pixeln in etwa konstant bleibt und somit eine gleichbleibende Genauigkeit gewährleistet werden kann. Dies kann bei größeren Arbeitsräumen und entsprechendem Betrachtungsabstand, etwa im Fabrikumfeld, theoretisch Marker mit einer Grundfläche von mehreren Quadratmetern erforderlich machen, was in der Praxis jedoch nicht mehr handhabbar ist.

3.3.2 Outside-in-Baummarkertracking

Das Outside-in-Markertracking mit retroreflektiven Markern und in der Umgebung angebrachten Infrarotkameras ist aus dem Virtual Reality-Bereich bekannt. Dort wird dieses Trackingprinzip häufig in sogenannten CAVEs (Cave Automatic Virtual Environment) eingesetzt, in welchen sich Anwender in einer dreidimensionalen virtuellen Realität bewegen können [DDS⁺09] [CSD93]. Abbildung 3.9 zeigt ein Beispiel für ein Augmented Reality-System nach dem Outside-in-Markertracking-Prinzip.

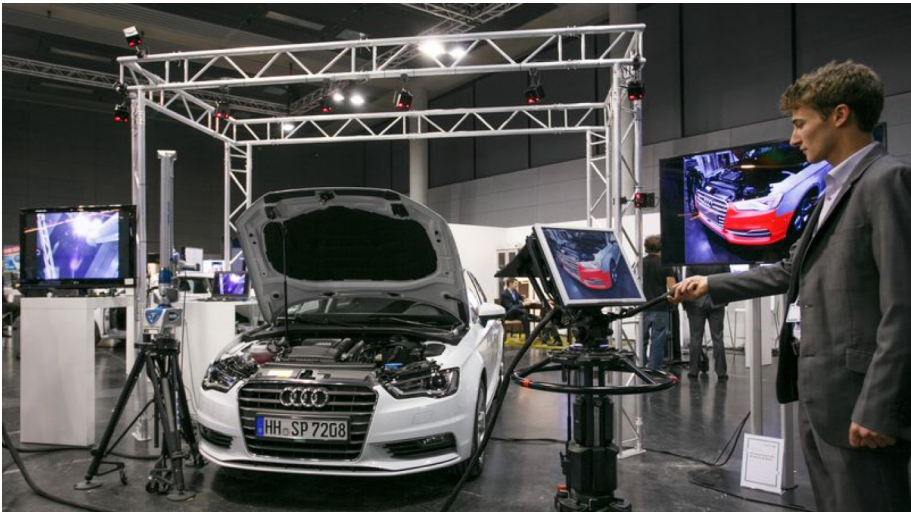


Abbildung 3.9: AR-System mit Outside-in-Baummarkertracking [ART17]

Bei diesem Systemsetup sind an einem Stahlgerüst mehrere Infrarotkameras angebracht, welche die räumliche Lage retroreflektiver Baummarker auf einer RGB-Kamera und auf dem betrachteten Untersuchungsobjekt erfassen [ART17] [Nöl06]. Die Videokamera ist zusammen mit einem Monitor, auf welchem die Augmented Reality-Überlagerung dargestellt wird, auf einem fahrbaren Gestell montiert. Das Gestell kann frei um das Untersuchungsobjekt herum bewegt werden. Durch die Verwendung mehrerer Kameras werden sowohl eine stabile Sichtverbindung als auch eine hohe Trackinggenauigkeit gewährleistet. Da der Aufbau recht sperrig ist, kann das System nur örtlich feststehend eingesetzt werden und ist für eine mobile Verwendung nicht geeignet.

Zur Einrichtung des Video-see-through-Systems sind zunächst die Abbildungseigenschaften der Infrarotkameras durch eine Kamerakalibrierung zu ermitteln. Bei kommerziell verfügbaren Outside-in-Trackingsystemen geschieht dies häufig noch vor der Auslieferung durch den Hersteller. Nach der Montage der Infrarotkameras am Stahlgestell müssen deren relative Lage zueinander bestimmt werden. Dazu wird z. B. ein Stab mit darauf angebrachten Infrarotmarkern durch den Arbeitsraum bewegt. Die Lage der Infrarotkameras zueinander kann aus der gleichzeitigen Abbildung des Markerstabs durch die verschiedenen Kameras abgeschätzt werden. Die Abbildungseigenschaften der auf dem Fahrgestell montierten RGB-Videokamera sind ebenfalls im Rahmen einer Kamerakalibrierung zu bestimmen (vgl. Abschnitt 2.2.3).

Abbildung 3.10 zeigt eine Prinzipskizze des Augmented Reality-Systems mit Outside-in-Baummarkertracking. Für die Überlagerung von physischen und virtuellen Objekten muss die Transformation ${}^K T_O$ vom betrachteten Objekt zur RGB-Videokamera bestimmt werden. Sie kann durch linksseitige Multiplikation der Transformationsmatrix ${}^{IR} T_O$ vom Objekt zu einer Infrarotkamera mit der Inversen der Transformationsmatrix ${}^{IR} T_K$ von der RGB-Videokamera zu dieser Infrarotkamera gebildet werden:

$${}^K T_O = ({}^{IR} T_K)^{-1} ({}^{IR} T_O) \quad (3.2)$$

mit

$${}^{IR} T_K = {}^{IR} T_{BK} {}^{BK} T_K \quad (3.3)$$

$${}^{IR} T_O = {}^{IR} T_{BO} {}^{BO} T_O. \quad (3.4)$$

Die Transformationen ${}^{IR} T_{BK}$ vom Baummarker auf der RGB-Kamera zur Infrarotkamera und ${}^{IR} T_{BO}$ vom Baummarker auf dem untersuchten Objekt zur Infrarotkamera werden mithilfe der Beobachtungen der Infrarotkameras abgeschätzt.

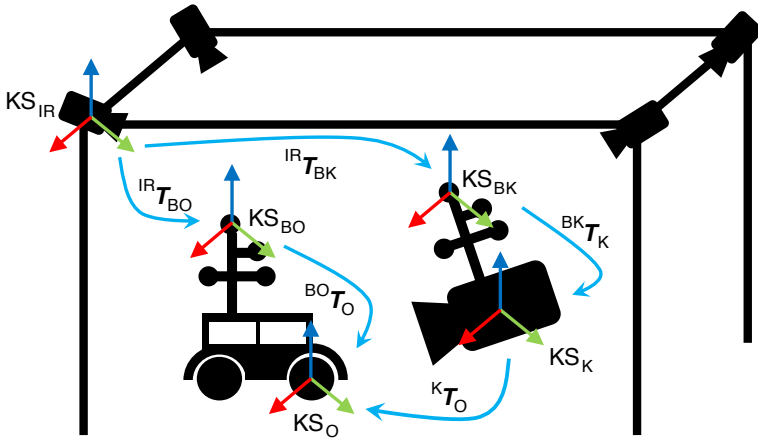


Abbildung 3.10: Prinzipskizze Outside-in-Baummarkertracking

Die Transformation ${}^{BK}T_K$ von der RGB-Kamera zum darauf angebrachten Baummarker lässt sich z. B. mithilfe eines Inside-out-Quadratmarkertrackings über die RGB-Videokamera ermitteln. Dabei werden ein Quadratmarker und ein Baummarker, deren Lage zueinander bekannt ist, sowohl inside-out mit der RGB-Kamera als auch outside-in mit der Infrarotkamera getrackt. Anhand dieser Beobachtungen lässt sich anschließend die Lage des Baummarkers gegenüber der RGB-Videokamera abschätzen. Die Transformation ${}^{BO}T_O$ vom Untersuchungsobjekt zum darauf angebrachten Baummarker kann, ähnlich wie beim Quadratmarkertracking, mithilfe geometrischer Markeradapter bestimmt werden. Dadurch ist die Lage der Baummarker direkt im Koordinatensystem des betrachteten Untersuchungsobjektes bekannt.

3.3.3 Mechanisches Tracking

Für Augmented Reality-Systeme mit mechanischem Tracking werden im automobilen Umfeld häufig aus der Messtechnik bekannte Mehrgelenkmessarme eingesetzt. Abbildung 3.11 zeigt ein typisches Systemsetup. Auf der handgeführten Pistole des Messarms ist eine Videokamera angebracht und filmt die Umgebung. Der mit den virtuellen Informationen kombinierte Videodatenstrom wird an einen Desktop-Computer oder Laptop weitergeleitet und auf einem örtlich feststehenden Monitor visualisiert. Zur Interaktion stehen Tastatur und Maus sowie verschiedene Tasten an der Messpistole zur Verfügung. Damit das

System leichter transportiert werden kann, sind die einzelnen Komponenten in diesem Beispiel auf einem fahrbaren Wagen angebracht [Gei12].

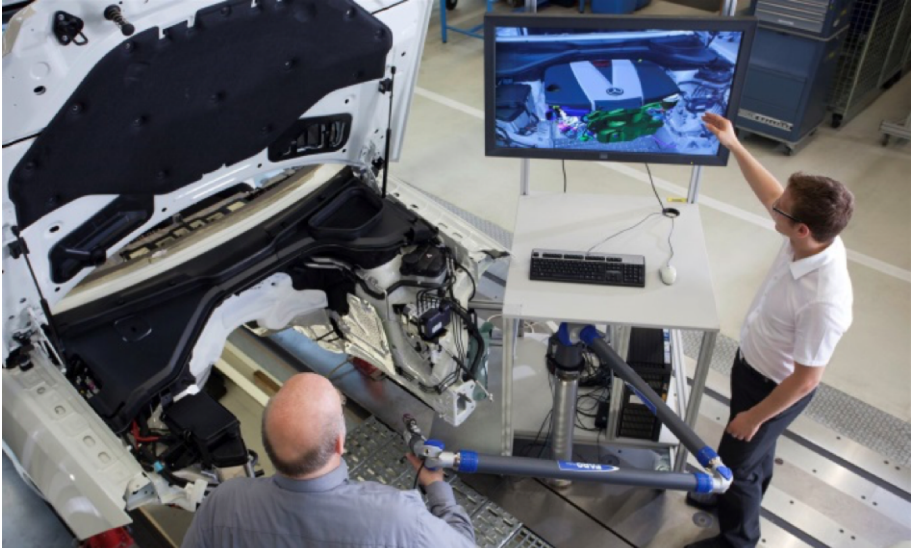


Abbildung 3.11: AR-System mit mechanischem Tracking [DAI18]

Zur Einrichtung des Video-see-through-Systems sind zunächst die Abbildungseigenschaften der Videokamera im Rahmen einer Kamerakalibrierung zu bestimmen (vgl. Abschnitt 2.2.3). Für das Tracking muss die Lage der Kamera gegenüber dem Untersuchungsobjekt mithilfe des mechanischen Messarms ermittelt werden. Abbildung 3.12 zeigt die erforderlichen Transformationen. Die Transformation ${}^K T_O$ vom untersuchten physischen Objekt zur Kamera kann durch linksseitige Multiplikation der Transformationsmatrizen ${}^{MB} T_O$ vom Objekt zur Messarmbasis, ${}^{MP} T_{MB}$ von der Messarmbasis zum Montagepunkt der Kamera an der Messpistole und ${}^K T_{MP}$ vom Montagepunkt der Kamera zur Kamera selbst gebildet werden:

$${}^K T_O = {}^K T_{MP} {}^{MP} T_{MB} {}^{MB} T_O. \quad (3.5)$$

Zur Bestimmung der Transformation ${}^K T_{MP}$ von der Messpistole zur Kamera kann ein Kalibriermuster mit Quadratmarkern eingesetzt werden, welches mit der Messpistole angetastet und mit der Videokamera abgelichtet wird.

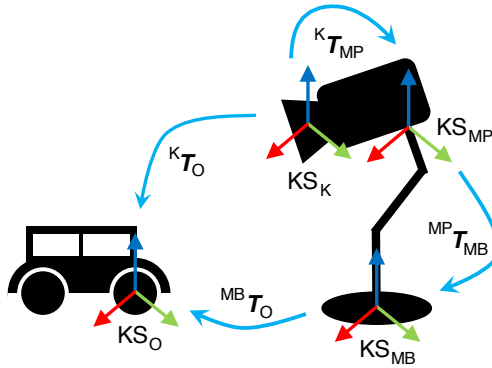


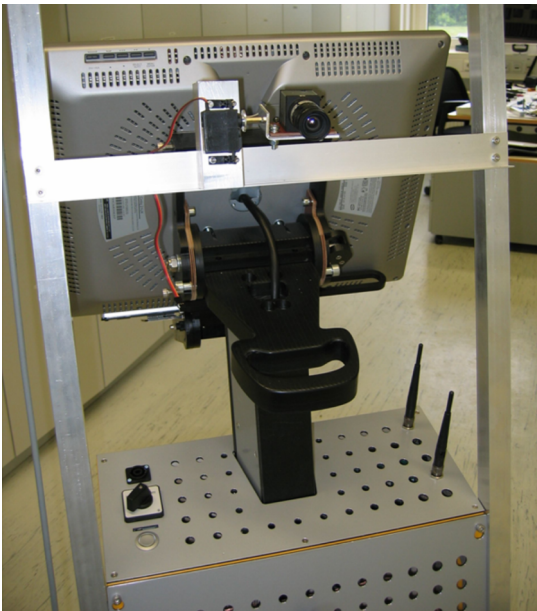
Abbildung 3.12: Prinzipskizze mechanisches Tracking

Durch das Antasten ist die Lage der Messarmbasis gegenüber dem Muster bekannt. Die Lage der Kamera gegenüber dem Muster kann über ein Quadratmarkertracking abgeschätzt werden. Gleichzeitig wird die Lage der Messpistole gegenüber der Messarmbasis durch den Messarm bestimmt. Mit den so gewonnenen Informationen wird die Lage der Kamera gegenüber der Messpistole abgeschätzt [BGK13]. Die Transformation ${}^{MP}T_{MB}$ von der Messarmbasis zur Messpistole wird über die Gelenkwinkelstellungen des Messarms bestimmt. Um die Transformation ${}^{MB}T_O$ vom betrachteten Objekt zur Messarmbasis zu ermitteln, wird auf Standardmethoden und -software der Messtechnik zurückgegriffen. Mit der Messspitze werden Referenzelemente wie Bohrungen, Bolzen, Flächen, Kanten oder Punkte am Untersuchungsobjekt angetastet. Sind deren Koordinaten bekannt, kann die Lage der Messarmbasis gegenüber dem Untersuchungsobjekt z. B. durch eine Best-Fit- oder eine 3-2-1-Ausrichtung abgeschätzt werden.

Der Arbeitsraum messarmbasierter Augmented Reality-Systeme ist durch die Länge der Armsegmente begrenzt. Wird der Arm umgesetzt, ist eine erneute Bestimmung der Lage der Messarmbasis gegenüber dem betrachteten Objekt erforderlich. Allerdings muss im Gegensatz zu optischen Trackingsystemen keine Sichtverbindung z. B. zu optischen Markern bestehen, wodurch der vorhandene Arbeitsraum optimal genutzt werden kann. Je nach Qualität der Kalibrierung können messarmbasierte Systeme eine Überlagerungsgenauigkeit von bis zu einem Millimeter erreichen [BGK13].

3.3.4 Lasertracking

Um einen sehr großen Arbeitsraum z. B. auf Hallenebene im Fabrikumfeld abdecken zu können, werden Augmented Reality-Systeme mit Lasertracking eingesetzt. Das Lasertracking lässt sich sowohl inside-out [SM10] als auch outside-in [Bad12] realisieren. Stellvertretend für die Kategorie der Augmented Reality-Systeme mit Lasertracking soll im Folgenden das in Abbildung 3.13 dargestellte Inside-out-System näher betrachtet werden.



(a) Tabletcomputer und Kamera mit Servomotor



(b) Kalibrierbau

Abbildung 3.13: AR-System mit Lasertracker [SM10]

Das System besteht aus einem Wagen, auf welchem der auf einem Teleskoparm montierte Lasertracker, eine auf einem Servomotor angebrachte Videokamera, eine Tastatur, ein großer Tabletcomputer mit Stiftbedienung sowie Autobatterien zur Stromversorgung montiert sind. Der Lasertracker erfasst zylindrische retroreflektive Messmarken, welche in der Hallenumgebung platziert sind. Anhand dieser Marker kann der Lasertracker seine zweidimensionale Position auf einer Ebene parallel zum Boden sowie die Drehung um die zu dieser Ebene

orthogonale Achse bestimmen. Die restlichen Freiheitsgrade der Kamera, also die vertikale Perspektive, werden mithilfe des Servomotors bestimmt [SM10] [SM12].

Zur Kalibrierung des Systems müssen, wie bei allen Video-see-through-Systemen, zunächst die Abbildungseigenschaften der Videokamera durch eine Kamerakalibrierung ermittelt werden. Die Transformation ${}^K T_O$ vom untersuchten Objekt zur Kamera wird entsprechend der Prinzipskizze in Abbildung 3.14 mithilfe des Lasertrackers bestimmt. Sie kann durch linksseitige Multiplikation der Transformationsmatrizen ${}^{LM} T_O$ vom untersuchten Objekt zum Lasermarker, ${}^L T_{LM}$ vom Lasermarker zum Laser und ${}^K T_L$ vom Laser zur Kamera gebildet werden:

$${}^K T_O = {}^K T_L {}^L T_{LM} {}^{LM} T_O. \quad (3.6)$$

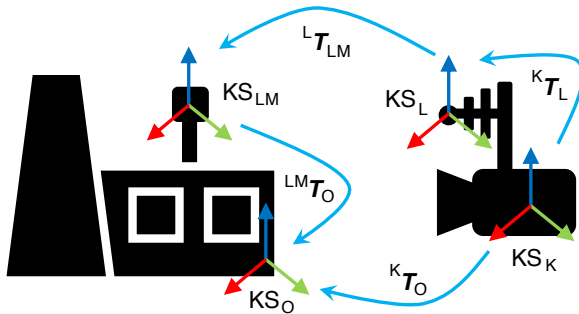


Abbildung 3.14: Prinzipskizze Lasertracking

Die Transformation ${}^K T_L$ vom Laser zur Kamera wird unter Berücksichtigung der Stellungen des Servomotors bestimmt. Dazu wird ein Kalibriermuster verwendet, welches aus mehreren Quadratmarkern zur Bestimmung der Kameralage sowie zwei retroreflektiven Marken zur Ermittlung der Lage des Lasertrackers besteht. Da die Positionen und Orientierungen der verschiedenen Markertypen relativ zueinander sowie die Höhe des auf dem Teleskoparm montierten Lasertrackers bekannt sind, kann anhand dieser Informationen die relative Lage der Kamera gegenüber dem Lasertracker abgeschätzt werden. Um den Kalibrieraufwand gering zu halten, wird diese Kalibrierung beim Beispielsystem für diskrete 20° -Schritte des Servomotors durchgeführt. Die Transformation ${}^L T_{LM}$ vom Lasermarker zum Laser wird anhand der interferometrischen Verschiebung des von den Marken reflektierten Laserstrahls abgeschätzt. Zur Bestimmung der

Transformation ${}^{\text{LM}}T_{\text{O}}$ vom betrachteten Objekt zum Lasermarker wird die Lage der Marker in der Fabrikhalle mit einem Theodoliten vermessen. Dieser Schritt nimmt für eine komplette Halle etwa einen Tag in Anspruch [SM12] [SM10].

Die Entfernung des Lasertrackers zu den retroreflektiven Markern darf bei dem vorgestellten System maximal 70 Meter betragen, wobei immer mindestens drei Marker gleichzeitig sichtbar sein müssen. Das System arbeitet mit bis zu 12.000 retroreflektiven Markern, mit welchen sich eine Fläche von mehreren hundert Quadratmetern abdecken lässt. Der Lasertracker ist auf dem Teleskoparm in einer Höhe von etwa zwei Metern platziert, um eine stabile Sichtverbindung zu den Messmarken zu garantieren. Zum besseren Transport lässt sich der Teleskoparm einfahren. Die erreichbare Überlagerungsgenauigkeit zwischen physischen und virtuellen Objekten ist unter anderem von dem Abstand des Lasertrackers zu den retroreflektiven Messmarken abhängig. Im Nah- und Mittelbereich lässt sich mit dem beschriebenen System eine Überlagerungsgenauigkeit von etwa 20 Millimetern erreichen, welche im Fernbereich jedoch abnimmt [SM12] [SM10].

3.4 Handlungsbedarfe

Die im vorigen Abschnitt vorgestellten Systemlösungen unterscheiden sich besonders hinsichtlich der eingesetzten Trackingtechnologien, wodurch wiederum wichtige Eigenschaften des Gesamtsystems wie Überlagerungsgenauigkeit, Arbeitsraum, Flexibilität und Mobilität vorgegeben werden. Auch die für eine Augmented Reality-Untersuchung erforderlichen Kalibrier- und Registrierungs-schritte unterscheiden sich dementsprechend. Dennoch lassen sich gemäß Abbildung 3.15 auf abstrakter Ebene einige allgemeingültige Tätigkeiten identifizieren.

Unabhängig von der technologischen Umsetzung muss ein Augmented Reality-System zunächst eingerichtet werden. Dazu gehören die Kalibrierung der Systemkomponenten, z. B. des Visualisierungs- oder des Trackingsystems, das Vorbereiten der CAD-Daten, also z. B. die Auswahl und eine eventuelle Konvertierung in ein durch das AR-System lesbares Datenformat, sowie die Einrichtung des Trackingsystems. Wurden diese Schritte durchgeführt, kann die eigentliche Untersuchung beginnen. Auf Basis der Trackinginformationen werden physische und virtuelle Objekte überlagert. Für die Analyse kommen verschiedene Darstellungs-, Transformations- und Messwerkzeuge zum Einsatz. Schließlich

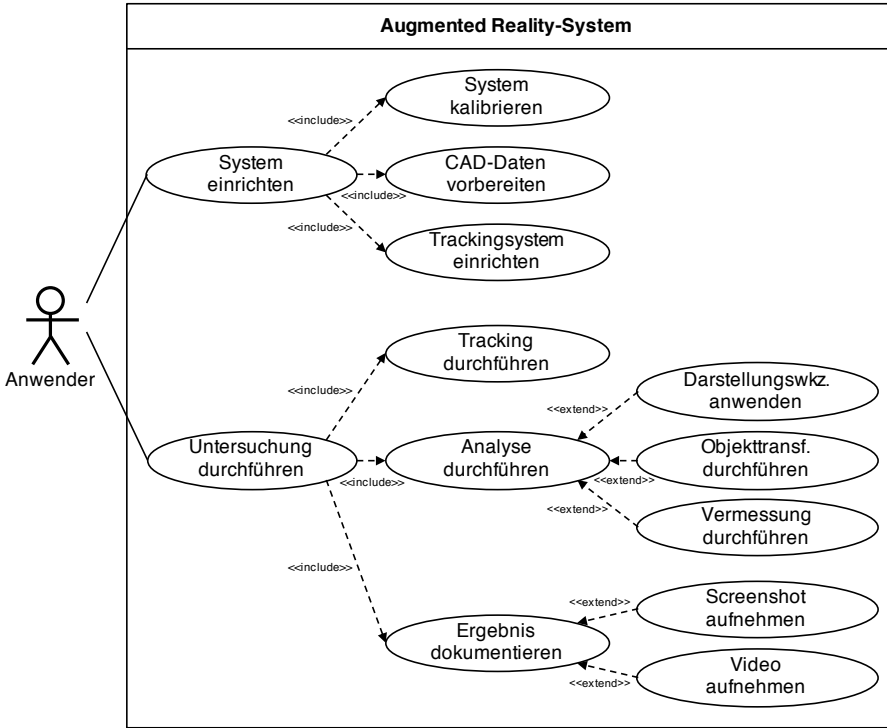


Abbildung 3.15: Anwendungsfalldiagramm Augmented Reality-Untersuchung

wird das Ergebnis der Untersuchung z. B. in Form von Screenshots oder Videos dokumentiert.

Die aufgezeigten Anwendungsfälle können mit den im vorigen Abschnitt vorgestellten Augmented Reality-Systemen weitestgehend erfüllt werden. Allerdings scheitert die Einführung von Augmented Reality-Lösungen trotz des nachgewiesenen Potenzials häufig an Akzeptanzproblemen der Anwender [Tüm09], da die Systeme keinen durchgängigen Gesamtprozess bieten [Pen09]. Für die einzelnen Schritte wie etwa die Kamerakalibrierung, die Vorbereitung der CAD-Daten oder die Einrichtung des Trackingsystems muss oft zusätzliche Software verwendet werden, welche nicht in die Augmented Reality-Anwendungen integriert ist. Augmented Reality-Systeme weisen deshalb häufig keine durchgängige Bedienlogik auf [Bad12]. Die einzelnen Programme sind in der Regel Expertenanwendungen und setzen entsprechende Kenntnisse z. B. in den Disziplinen Optik, Messtechnik

und Informatik voraus. Erschwerend kommt hinzu, dass der Ergebnisübertrag zwischen diesen einzelnen Hilfsprogrammen und anschließend in die eigentliche Augmented Reality-Software häufig manuell erfolgen muss [BGK13]. So wird etwa mithilfe eines Kalibrierprogrammes eine Kalibrierdatei erzeugt, welche anschließend händisch in ein durch die AR-Software lesbares Format überführt werden muss. Diese manuellen Prozesse sind nicht nur zeitintensiv, sondern auch extrem fehleranfällig. Einrichtung und Betrieb von industriellen Augmented Reality-Systemen benötigen dadurch viel Erfahrung, eventuelle Fehler sind für ungeübte Anwender nur schwer erkennbar.

Aufgrund der zerklüfteten Softwarelösungen ohne einheitliche Arbeitsabläufe werden Augmented Reality-Systeme in der Praxis selten selbstständig durch die Fachbereiche eingesetzt. Die Bedienung erfolgt im Regelfall durch die Systementwickler selbst oder durch speziell geschulte Experten. Weil oft keine einfach überschaubaren Vorgehensweisen für wiederkehrende Problemstellungen wie die CAD-Datenaufbereitung, die Ausrichtung auf ein Untersuchungsobjekt oder die Kalibrierung existieren, ist zudem der Aufwand für die Durchführung von Augmented Reality-Untersuchungen häufig unklar. Da reproduzierbare Standardprozesse fehlen, ist auch der wirtschaftliche Nutzen eines Augmented Reality-Einsatzes selten transparent.

3.5 Forschungshypothese und weiteres Vorgehen

Auf Basis der identifizierten Handlungsbedarfe wird zur Nutzbarmachung der Technologie Augmented Reality für geometrische Analysen in der Produktentstehung die folgende Forschungshypothese aufgestellt:

Forschungshypothese: Augmented Reality-Systeme sind in ihren einzelnen technischen Komponenten so weit ausgereift, dass die Nutzung für geometrische Analysen in der industriellen Produktentstehung auch durch unerfahrene Anwender einfach möglich ist, wenn der Schwerpunkt der Systementwicklung auf die Gebrauchstauglichkeit des Gesamtsystems gelegt wird.

Um ein gebrauchstaugliches Augmented Reality-System entwickeln zu können, soll im weiteren Verlauf der Arbeit der menschenzentrierte Gestaltungsprozess nach DIN EN ISO 9241-210 verfolgt werden (vgl. Abschnitt 2.3.3). Abbildung 3.16 zeigt die Zuordnung der einzelnen Phasen des menschenzentrierten Gestaltungsprozesses zu den folgenden Kapiteln.

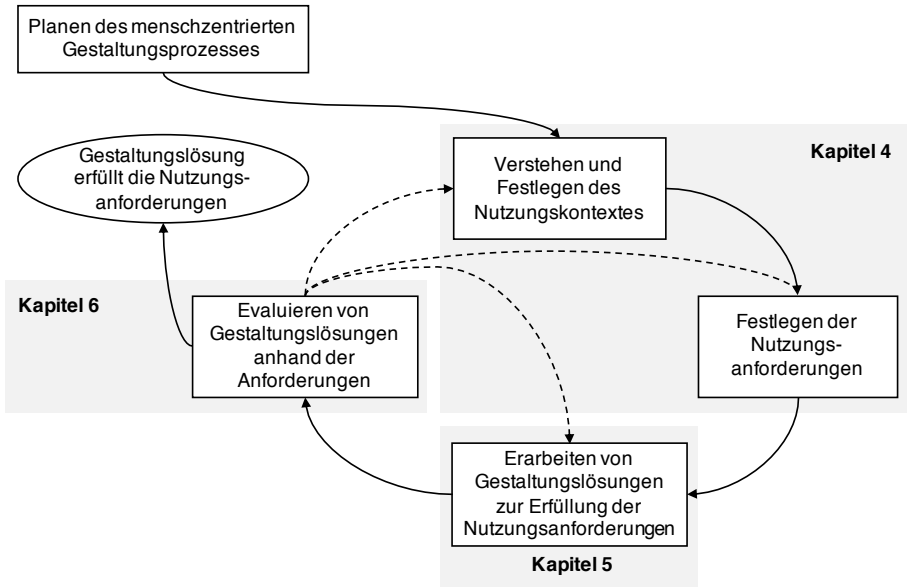


Abbildung 3.16: Vorgehen nach dem menschenzentrierten Gestaltungsprozess

Kapitel 4 beschreibt zunächst technologisch unabhängig den erwarteten Nutzungskontext sowie die Ableitung und Analyse der funktionalen und nicht-funktionalen Nutzungsanforderungen an das zu entwickelnde Augmented Reality-System. Auf dieser Basis werden in Kapitel 5 die erforderlichen Systemkomponenten ausgewählt und die resultierenden Arbeitsabläufe inklusive einer entsprechenden Benutzerführung erarbeitet. Im Sinne der aufgestellten Forschungshypothese wird dabei angestrebt, alle Tätigkeiten zur Durchführung einer Augmented Reality-Untersuchung in einem durchgängigen Gesamtprozess ohne Softwarebrüche abzubilden. Abschließend wird in Kapitel 6 die resultierende Gebrauchstauglichkeit des entwickelten Augmented Reality-Systems bezüglich der drei Kriterien Effektivität, Effizienz und Zufriedenstellung im Rahmen einer Probandenstudie evaluiert.

3.6 Zusammenfassung

Augmented Reality-Anwendungen für die geometrische Analyse in der Produktentstehung können in die beiden Kategorien Umfeld- und Qualitätsanalyse

eingeteilt werden. Bei der Umfeldanalyse wird das physische Umfeld durch zusätzliche virtuelle Objekte ergänzt, z. B. um Störkonturen oder Befestigungspunkte zwischen physischen und virtuellen Umfängen zu analysieren. Bei der Qualitätsanalyse wird ein physisches Objekt mit seinen korrespondierenden virtuellen Konstruktionsdaten überlagert. Dadurch lassen sich Abweichungen zwischen physischen und virtuellen Umfängen visuell identifizieren. Die Möglichkeit, physische und virtuelle Entwicklungstätigkeiten zu beliebigen Zeitpunkten im Produktentstehungsprozess synchronisieren und abgleichen zu können, bewirkt eine Steigerung der Produkt- und Prozessqualität sowie eine Reduktion der Kosten und des Zeitbedarfs für die Entwicklung des Produktes sowie des Produktionssystems.

Zur Analyse des geometrischen Zusammenspiels physischer und virtueller Objekte können verschiedene Untersuchungswerkzeuge zum Einsatz kommen. Neben der Darstellungsart, z. B. in Form von Drahtgitterdarstellungen, Transparenzen oder Schnitten, können Transformationen der virtuellen Objekte sowie messtechnische Werkzeuge eingesetzt werden. Aus der Literatur sind verschiedene Umsetzungen von Augmented Reality-Systemen bekannt. Sie unterscheiden sich besonders hinsichtlich der eingesetzten Trackingtechnologien, welche wiederum grundlegende Eigenschaften wie etwa die Genauigkeit, den Arbeitsraum, die Flexibilität oder die Mobilität eines Augmented Reality-Systems bestimmen. Auch der Kalibrierungs- und Einrichtungsprozess ist stark von der gewählten Trackingmethode abhängig.

Obwohl die einzelnen Komponenten der betrachteten Augmented Reality-Systeme ausgereift erscheinen, werden die zur Durchführung einer Untersuchung notwendigen Schritte häufig nicht in einen für den Benutzer durchgängigen Gesamtprozess eingebunden. Industrielle Augmented Reality-Systeme zur geometrischen Analyse sind dadurch im Regelfall Expertensysteme, die von den Fachbereichen aufgrund des zur Einrichtung und Bedienung benötigten Wissens selten selbstständig eingesetzt werden. In diesem Zusammenhang wurde die Hypothese aufgestellt, dass Augmented Reality-Systeme in ihren einzelnen technischen Komponenten so weit ausgereift sind, dass die Nutzung für geometrische Analysen in der industriellen Produktentstehung auch durch unerfahrene Anwender einfach möglich ist, wenn bei der Systementwicklung die Gebrauchstauglichkeit des Gesamtsystems in den Vordergrund gestellt wird. Um diese Hypothese zu überprüfen, soll in den folgenden Kapiteln ein gebrauchstaugliches Augmented Reality-System auf Basis des menschenzentrierten Gestaltungsprozesses entwickelt und evaluiert werden.

4 Anforderungen

Um ein gebrauchstaugliches Augmented Reality-System für die geometrische Analyse in der Produktentstehung zu entwickeln, soll der menschenzentrierte Gestaltungsprozess nach DIN EN ISO 9241-210 verfolgt werden (vgl. Abschnitt 2.3.3). Dieses Kapitel beschreibt zunächst die ersten beiden Phasen des iterativen menschenzentrierten Gestaltungsansatzes, das Verstehen und Festlegen des Nutzungskontextes sowie darauf basierend das Ableiten der Nutzungsanforderungen. Die Nutzungsanforderungen werden anschließend den vier Systemkomponenten Tracking- und Visualisierungssystem, Eingabegerät und EDV-System gegenübergestellt.

4.1 Nutzungskontext

Zur Beschreibung des Nutzungskontextes werden im Folgenden die Ziele des Augmented Reality-Einsatzes, die potenziellen Benutzer, die mithilfe des Systems zu analysierenden Untersuchungsobjekte sowie die physischen, organisatorischen und technischen Rahmenbedingungen betrachtet.

4.1.1 Ziele

Mithilfe des zu entwickelnden Augmented Reality-Systems soll das geometrische Zusammenspiel von physischen und virtuellen Modellen analysiert werden. Die Anwendungsziele lassen sich weiter in die beiden Kategorien Umfeld- und Qualitätsanalyse gliedern (vgl. Abschnitt 3.1).

Umfeldanalyse

Bei der Umfeldanalyse wird das Zusammenspiel einer physischen Umgebung mit virtuellen 3D-Modellen untersucht, welche im Allgemeinen nicht physisch vorhanden sind. Anwendungsziel kann z. B. die Beurteilung von Freigängen, Störkonturen, Auflage- oder Anbindungspunkten sein. Bei der Bewertung von

Freigängen wird untersucht, ob der Abstand zwischen einer physisch vorhandenen Umgebung und einem virtuellen Objekt ausreichend groß ist, z. B. um eine Montage oder Demontage durchführen zu können. Bei der Analyse von Störkonturen wird untersucht, ob es eventuelle Überschneidungen zwischen physischen und virtuellen Objekten gibt, diese also aneinanderstoßen oder sich durchdringen würden. Bei der Untersuchung von Auflage- und Anbindungspunkten wird z. B. untersucht, ob eine Auflage in der korrekten Höhe angebracht ist, oder ob das Lochbild zweier Bohrungen eines virtuellen und eines physischen Objektes zueinander passend ist.

Qualitätsanalyse

Bei der Qualitätsanalyse wird ein physisches Objekt mit seinen zugehörigen virtuellen Konstruktionsdaten überlagert, um einen Soll-Ist-Abgleich durchzuführen. Ziel des visuellen Abgleichs kann entweder die Beurteilung der Ausführungsqualität physischer Umfänge sein, dann geben die virtuellen Daten das Soll vor, gegen welches das physische Ist geprüft wird. Oder es kann die Datenqualität virtueller Umfänge geprüft werden, dann geben die physischen Umfänge das Soll vor, gegen welches das virtuelle Ist geprüft wird. Der Soll-Ist-Abgleich dient in beiden Fällen der Erkennung z. B. fehlender Objekte, zusätzlicher Objekte sowie Lage- und Formabweichungen. Fehlende Objekte sind in den Soll-Vorgaben vorhanden, im Ist-Zustand jedoch nicht abgebildet. Zusätzliche Objekte sind demgegenüber im Ist-Zustand vorhanden, jedoch nicht im Soll-Zustand. Lageabweichungen beschreiben die abweichende Lage eines Ist-Objektes gegenüber den Soll-Vorgaben. Formabweichungen betreffen geometrische Abweichungen der äußeren Gestalt gegenüber dem Soll-Zustand.

4.1.2 Benutzer

Das zu entwickelnde Augmented Reality-System soll hauptsächlich durch Mitarbeiter in der Produktentwicklung und der Produktionssystementwicklung eingesetzt werden. Die potenziellen Benutzer beherrschen durch ihre täglichen Arbeitsaufgaben den Umgang mit Computern, Smartphones und Tabletcomputern. Sie arbeiten häufig mit virtuellen Konstruktionsmodellen und untersuchen messtechnische Fragestellungen an physischen Objekten, welche potenziell im Rahmen einer Augmented Reality-Analyse beantwortet werden können. Dadurch ist ein entsprechendes Grundverständnis für die beiden Anwendungskategorien Umfeld- und Qualitätsanalyse vorhanden. Weitergehende Kenntnisse in den

Bereichen Augmented Reality, Optik, Computer Vision, Tracking oder Informatik sind bei den potenziellen Benutzern in der Regel nicht vorhanden. Sie erwarten ein einfach bedienbares Augmented Reality-System, welches sie bei ihrem eigentlichen Ziel der Umfeld- oder Qualitätsanalyse effektiv, effizient und zufriedenstellend unterstützt und dessen Bedienung keine aufwendigen Schulungen voraussetzt.

4.1.3 Untersuchungsobjekte

Für eine Augmented Reality-Untersuchung sind eine physische und eine virtuelle Untersuchungskomponente erforderlich. Die virtuelle Komponente wird durch geometrische 3D-CAD-Konstruktionsdaten repräsentiert. Die physische Komponente wird durch das physische Umfeld, in dessen Kontext die virtuellen Daten beurteilt werden sollen, repräsentiert. Da sowohl das Produkt als auch das Produktionssystem in der Regel als 3D-CAD-Daten vorliegen, sind die potenziellen Kombinationsmöglichkeiten physischer und virtueller Untersuchungsobjekte breit gefächert.

Produkt

Das Produkt betreffend sollen mithilfe des zu entwickelnden Augmented Reality-Systems geometrische Fragestellungen zu Bauteilen, Baugruppen oder das Gesamtprodukt betreffend beantwortet werden. Zur Verdeutlichung der Vielzahl an Kombinationsmöglichkeiten aus physischen und virtuellen Produktumfängen wird der vereinfachte Ausschnitt eines Fahrzeugstrukturbaums in Abbildung 4.1 betrachtet.

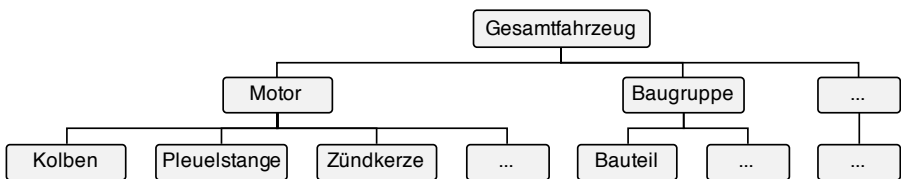


Abbildung 4.1: Hierarchische Produktstruktur

Theoretisch kann jedes der Elemente im Fahrzeugstrukturbaum als physische oder virtuelle Untersuchungskomponente dienen. Jedes Untersuchungsobjekt

besitzt ein eigenes Koordinatensystem sowie eine definierte Lage in einem übergeordneten Koordinatensystem. So hat z. B. das Koordinatensystem des Fahrzeugs seinen Ursprung in der Mitte der Vorderräder, die z -Achse zeigt nach oben, die x -Achse nach hinten und die y -Achse auf das rechte Vorderrad. Innerhalb dieses Koordinatensystems ist z. B. die Lage des Motors definiert. Der Motor hat sein eigenes Bauteilkoordinatensystem, welches durch bestimmte Aufnahmepunkte im Motorraum im Fahrzeugkoordinatensystem definiert ist. Innerhalb des Bauteilkoordinatensystems des Motors sind wiederum verschiedene Unterbauteile wie Kolben, Pleuelstange oder Zündkerzen positioniert. Auch diese Unterbauteile haben ihrerseits eigene Koordinatensysteme. Auf diese Weise ist die gesamte Lage aller Bauteile des Gesamtfahrzeugs zueinander über Maßketten und Toleranzen aufgebaut.

Wenn z. B. eine mögliche Formabweichung an der Pleuelstange analysiert werden soll, muss das virtuelle Konstruktionsmodell der Pleuelstange relativ zum Bauteilkoordinatensystem der physischen Pleuelstange ausgerichtet werden. Soll hingegen die Lage der Pleuelstange in der übergeordneten Baugruppe Motor beurteilt werden, darf eine Ausrichtung nicht über das Referenzkoordinatensystem der Pleuelstange selbst erfolgen. Stattdessen sind die virtuellen Modelle, je nach Untersuchungsziel, an einem übergeordneten Referenzkoordinatensystem auszurichten, etwa dem des Motors oder auch des Gesamtfahrzeugs. Das zur Ausrichtung heranzuziehende Koordinatensystem wird also durch das konkrete Untersuchungsszenario definiert. Die physische Untersuchungskomponente bestimmt damit nicht nur das betrachtete physische Objekt, sondern auch das Referenzkoordinatensystem, in dessen Kontext das virtuelle Objekt bewertet werden soll.

Produktionssystem

Auch die Untersuchungsobjekte im Produktionssystem lassen sich verschiedenen Betrachtungsebenen zuordnen. Abbildung 4.2 zeigt dazu den vereinfachten Ausschnitt der hierarchischen Struktur einer Fabrik.

Ein übergeordnetes Element definiert dabei ebenso wie beim Produkt die Lage der jeweils untergeordneten Elemente in einem gemeinsamen Koordinatensystem. Zunächst kann eine Fabrik z. B. in Fertigungsbereiche untergliedert werden, in welchen die Arbeitsstationen positioniert sind. Innerhalb einer Arbeitsstation sind wiederum sowohl die Betriebsmittel als auch das Produkt im entsprechenden Aufbauzustand lagemäßig definiert. Die Betriebsmittel besitzen dabei, ebenso wie das Produkt, einen eigenen Strukturbaum entsprechend Abbildung 4.1.

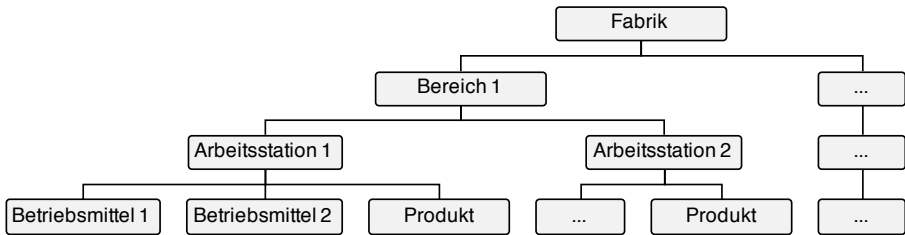


Abbildung 4.2: Hierarchische Fabrikstruktur

In der Produktionssystementwicklung sollen mithilfe des zu entwickelnden Systems hauptsächlich Augmented Reality-Analysen auf den Betrachtungsebenen Arbeitsstation sowie Betriebsmittel bzw. Produkt durchgeführt werden. Gerade im Rahmen der Betriebsmittel- und Anlagenplanung müssen auf diesen Ebenen viele Fragestellungen zwischen physischen und virtuellen Entwicklungsständen sowohl des Produktionssystems als auch des Produktes beantwortet werden. Augmented Reality-Untersuchungen auf Bereichs- oder Fabrikebene stehen nicht im Fokus.

4.1.4 Rahmenbedingungen

Die Rahmenbedingungen für den Systemeinsatz lassen sich in physische, organisatorische und technische Aspekte aufteilen.

Physische Rahmenbedingungen

In der Produktentwicklung soll das zu entwickelnde Augmented Reality-System in einer Prototypenwerkstatt oder einem vergleichbar kontrollierten Arbeitsumfeld eingesetzt werden. Die Lichtbedingungen lassen sich für einen Einsatz optimal gestalten. Störeinflüsse etwa durch Stöße, Schwingungen, Öle oder Feuchtigkeit können weitestgehend ausgeschlossen werden. Die Untersuchungsobjekte sind in der Regel unbewegt, die Umgebung verändert sich nicht oder nur kontrolliert. Auf Seite der Betriebsmittel- und Anlagenplanung müssen die physischen Rahmenbedingungen differenzierter betrachtet werden. Einerseits sollen auch hier Untersuchungen etwa an einzelnen Betriebsmitteln, losgelöst von ihrer Einordnung in das Produktionssystem, durchgeführt werden. Ebenso wie in der zuvor genannten Produktentwicklung finden diese Absicherungen zumeist in einer eigenen Werkstatt oder alternativ in der Werkstatt eines Lieferanten statt. Die physischen Rahmenbedingungen können auch hier etwa durch

zusätzliche Beleuchtung weitestgehend optimal gestaltet werden. Andererseits soll das Augmented Reality-System auch in der Produktion selbst zum Einsatz kommen. Produkt und Produktionsmittel sind hier in der Regel bewegt, das dynamische Umfeld verändert sich fortlaufend. Die Lichtverhältnisse sind stark vom konkreten Einsatzort in der Produktion abhängig, es treten häufig Vibrationen auf und die Umgebung kann etwa durch Fette, Öle oder Späne verschmutzt sein.

Organisatorische Rahmenbedingungen

Organisatorische Rahmenbedingungen betreffen z. B. die innerbetrieblichen Arbeitsabläufe. Tritt in einem Fachbereich der Bedarf für eine Augmented Reality-Analyse auf, muss diese durch den Anwender des Augmented Reality-Systems geplant, vorbereitet und durchgeführt werden. Die erforderliche Reaktionszeit ist je nach Anwendungsfall unterschiedlich und kann von wenigen Stunden bis hin zu mehreren Tagen oder Wochen Vorlauf variieren. Besonders in der Betriebsmittel- und Anlagenplanung kommt es aufgrund international aufgestellter Produktionsverbunde sowie komplexer Lieferantenbeziehungen häufig vor, dass das zu entwickelnde Augmented Reality-System durch einen Mitarbeiter mit auf Reisen genommen und entsprechend transportiert werden muss.

Technische Rahmenbedingungen

Technische Rahmenbedingungen beschreiben die technische Systemumgebung. Neben Fragen der allgemeinen Datensicherheit, der Nutzerverwaltung oder der Kommunikation mit dem Unternehmensnetzwerk ist für das zu entwickelnde Augmented Reality-System besonders die Versorgung mit virtuellen 3D-Modellen relevant. Die Konstruktion des Produktes und des Produktionssystems erfolgt im betrachteten Unternehmen mittels Siemens NX. Die Konstruktionsdaten werden auf einem Produktdatenmanagement-System (PDM-System) abgelegt und von diesem automatisch unter anderem in das Jupiter Tessellation-Format (JT-Format) konvertiert. Das JT-Format ist ein ISO-Standard-Grafikformat für 3D-Daten und als solches für einen Datenaustausch gut geeignet. Datenzugriff und Verwaltung sind über ein entsprechendes Front-End mit diversen Such-, Filter- und Exportoptionen möglich. Zusätzlich werden durch Lieferanten häufig Betriebsmittel- oder Anlagendaten auf externen USB-Datenträgern bereitgestellt. Auch diese Daten liegen in der Regel im JT-Format vor.

4.2 Anforderungsbestimmung

In den folgenden Abschnitten werden die Anforderungen an das zu entwickelnde Augmented Reality-System abgeleitet.

Anforderungen lassen sich in funktionale und nicht-funktionale Anforderungen unterteilen. Funktionale Anforderungen beschreiben, was ein System tun soll, also welche Funktionalitäten durch das System bereitzustellen sind. Nicht-funktionale Anforderungen legen die Qualitätseigenschaften eines Systems fest und beschreiben dadurch, unter welchen Bedingungen die funktionalen Anforderungen erfüllt werden sollen.

4.2.1 Funktionale Anforderungen

Die grundlegenden Anwendungsfälle für ein industrielles Augmented Reality-System wurden bereits im Stand der Technik identifiziert (vgl. Abbildung 3.15). Demnach muss ein Augmented Reality-System Funktionalitäten zur Einrichtung inklusive Kalibrierung, Datenvorbereitung und Einrichtung des Trackingsystems sowie zur Untersuchung inklusive verschiedener Analyse- und Dokumentationswerkzeuge bereitstellen.

System kalibrieren

Die zur Einrichtung erforderlichen Kalibrierschritte sind stark von der technischen Umsetzung der einzelnen Systemkomponenten abhängig. Je nach Realisierung kann z. B. die Bestimmung der Abbildungseigenschaften einer zum Tracking oder zur Visualisierung eingesetzten Videokamera oder die Bestimmung der Lage eines Markers gegenüber einem zu trackenden Objekt erforderlich sein. Die Kalibrierwerkzeuge sollen nach Möglichkeit Teil des zu entwickelnden Augmented Reality-Systems sein.

Anforderung Kalibrierung: Alle zur Einrichtung des AR-Systems erforderlichen Kalibrierwerkzeuge stehen zur Verfügung.

Daten vorbereiten

Die Auswahl der mithilfe des Augmented Reality-Systems zu untersuchenden 3D-CAD-Daten soll im Front-End des im Unternehmen eingesetzten PDM-Systems stattfinden. Die virtuellen Daten sollen durch die Benutzer im JT-Format aus dem PDM-System exportiert und dadurch dem Augmented Reality-System zur

Verfügung gestellt werden. Zusätzlich soll es möglich sein, JT-Daten auch von externen Quellen einzulesen und für Augmented Reality-Analysen zu verwenden. Damit die gezielte Darstellung einzelner Teilumfänge möglich ist, sollen die in den JT-Daten definierte Objektstruktur sowie die Objektbezeichnungen erhalten bleiben.

Anforderung Datenvorbereitung: Das AR-System kann mit CAD-Daten im JT-Format sowohl aus dem verwendeten PDM-System als auch von externen Datenträgern versorgt werden.

Tracking einrichten und durchführen

Trackingsysteme müssen zunächst auf das physische Untersuchungsobjekt ausgerichtet werden. Sämtliche Untersuchungsobjekte besitzen durch ein Toleranzmanagement definierte Messmerkmale, über welche eine Ausrichtung durchgeführt werden kann. Messmerkmale für diese initiale Ausrichtung können z. B. (Eck-)Punkte, Passstifte, Bohrungen, Flächen oder Kanten der physischen Untersuchungsobjekte sein.

Anforderung Ausrichtung: Die Ausrichtung kann flexibel z. B. anhand von Punkten, Passstiften, Bohrungen, Flächen oder Kanten durchgeführt werden.

Von der initialen Ausrichtung ausgehend soll das Trackingsystem die Bewegung des Anwenders verfolgen. Da die Untersuchungsobjekte des Produktionssystems häufig ebenfalls bewegt sind, muss das Trackingsystem die Verfolgung mehrerer Bewegungen gleichzeitig erlauben.

Anforderung Bewegung: Das gleichzeitige Tracking sowohl eines bewegten Anwenders als auch bewegter Untersuchungsobjekte ist möglich.

Analyse durchführen

Im Rahmen einer Augmented Reality-Analyse soll der Anwender das Zusammenspiel zwischen physischen und virtuellen Umfängen bewerten. Um eine effektive und effiziente Analyse zu unterstützen, soll das zu entwickelnde Augmented Reality-System entsprechende Darstellungs-, Transformations- und Messwerkzeuge zur Verfügung stellen (vgl. Abschnitt 3.2).

Anforderung Darstellung: Virtuelle Objekte können als Volumen-, Schnitt- oder Drahtgittergeometrie sowie verdeckt, transparent und eingefärbt dargestellt werden.

Anforderung Transformation: Virtuelle Objekte können verschoben, gedreht und skaliert werden.

Anforderung Vermessung: Vermessungen können an physischen oder virtuellen Objekten sowie kombiniert zwischen physischen und virtuellen Objekten durchgeführt werden.

Ergebnis dokumentieren

Das Ergebnis einer Augmented Reality-Untersuchung soll in Form von Bildern oder Videos dokumentiert werden. Damit die Dokumentation einfach mit Kollegen geteilt werden kann, soll sie sich in einem möglichst neutralen Datenformat exportieren lassen.

Anforderung Dokumentation: Zur Dokumentation können Bilder oder Videos der überlagerten Darstellung aufgenommen und in einem neutralen Datenformat exportiert werden.

Damit ist der gesamte Prozess einer Augmented Reality-Analyse, von der Einrichtung des Systems über die Durchführung der Analyse bis zur Dokumentation der Ergebnisse funktional beschrieben und in entsprechenden Anforderungen dokumentiert.

4.2.2 Nicht-funktionale Anforderungen

Nicht-funktionale Anforderungen definieren die qualitativen Eigenschaften der Funktionserfüllung. Das zu entwickelnde System soll insgesamt effektiv, effizient und zufriedenstellend eingesetzt werden können, also eine hohe Gebrauchstauglichkeit aufweisen. Die Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit eines Systems müssen immer unter Beachtung der Nutzungsziele sowie des Nutzungskontextes definiert werden. Für einen effektiven Einsatz müssen zunächst die oben beschriebenen funktionalen Anforderungen erfüllt sein. Darüber hinaus sind für die Effektivität der durch das System abdeckbare Arbeitsraum sowie die erreichbare Überlagerungsgenauigkeit von physischen und virtuellen Objekten entscheidend.

Arbeitsraum und Genauigkeit

Eine visuelle Beurteilung des geometrischen Zusammenspiels von physischen und virtuellen Objekten ist nur dann möglich, wenn eine für das jeweilige Untersuchungsszenario hinreichend genaue Überlagerung von physischen und

virtuellen Objekten und ein ausreichender Arbeitsraum garantiert werden. Der abdeckbare Arbeitsraum und die benötigte Überlagerungsgenauigkeit stehen in enger Abhängigkeit zueinander. Zur näheren Erläuterung wird Abbildung 4.3 betrachtet. Allgemein kann gesagt werden, dass die tolerierbaren Abweichungen mit wachsendem Arbeitsraum tendenziell größer werden, die geforderte Analysegenauigkeit also abnimmt.

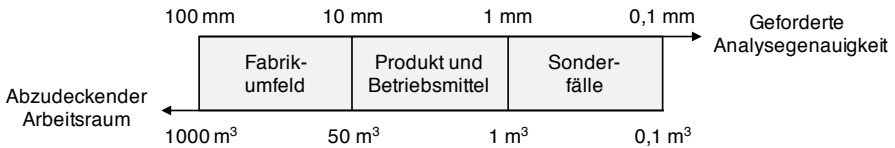


Abbildung 4.3: Zusammenhang zwischen Genauigkeit und Arbeitsraum

Mithilfe des zu entwickelnden Augmented Reality-System sollen Untersuchungen auf Produktseite an Bauteilen, Baugruppen oder das Gesamtfahrzeug betreffend, auf Produktionssystemseite an Betriebsmitteln oder dem Produkt innerhalb einer Arbeitsstation durchgeführt werden. Analysen auf Fabrikebene stehen, ebenso wie hochgenaue Sonderanwendungen, weniger stark im Fokus. Der durch das System abzudeckende Arbeitsraum entspricht damit der typischen Größe einer Arbeitsstation eines Produktionssystems aus der Automobilindustrie.

Anforderung Arbeitsraum: Der durch das AR-System abdeckbare Arbeitsraum beträgt mindestens 50 m³.

Die erforderliche Überlagerungsgenauigkeit ist abhängig von den einzuhaltenden Toleranzen des betrachteten Untersuchungsobjektes sowie des zugehörigen Referenzkoordinatensystems. Während z. B. bei einer frühen Konzeptanalyse der Anordnung neuer Betriebsmittel in einer Arbeitsstation eine Abweichung von einigen Zentimetern tolerierbar sein kann, ist bei der Absicherung der Fertigungsqualität einzelner Bauteile am Produkt mitunter eine Analysegenauigkeit einem Millimeter oder sogar darunter erforderlich. Für den Großteil der Absicherungen an Produkt, Betriebsmitteln und Arbeitsstationen wird davon ausgegangen, dass ein Überlagerungsfehler von maximal einem Millimeter tolerierbar ist.

Anforderung Genauigkeit: Der Überlagerungsfehler von virtuellen und physischen Objekten beträgt höchstens einen Millimeter.

Zeitaufwand

Um einen effizienten Einsatz des zu entwickelnden Augmented Reality-Systems sicherzustellen, sollte der zeitliche Aufwand für die Durchführung einer Untersuchung möglichst gering sein. Da der Zeitaufwand allgemein stark vom Untersuchungsumfang abhängig ist, wird an dieser Stelle bewusst auf eine konkrete Zeitangabe verzichtet.

Anforderung Zeitaufwand: Vorbereitung, Durchführung und Nachbereitung einer Augmented Reality-Untersuchung sind mit möglichst geringem Zeitaufwand möglich.

Kosten

Die Anschaffungs- und Betriebskosten des zu entwickelnden Augmented Reality-Systems bestimmen in erheblichem Maße die Effizienz des Systemeinsatzes und damit den tatsächlich erzielbaren Mehrwert. Sind die Kosten zu hoch, ist der Einsatz aus betriebswirtschaftlicher Sicht nicht mehr sinnvoll. Da der Mehrwert nicht direkt bezifferbar ist, wird auch an dieser Stelle auf die Angabe eines konkreten Zahlenwerts verzichtet.

Anforderung Kosten: Die Anschaffungs- und Betriebskosten des Augmented Reality-Systems sind möglichst gering.

Transport

Das zu entwickelnde Augmented Reality-System soll unter anderem für Qualitäts- und Umfeldanalysen bei Lieferanten oder an verschiedenen Arbeitsstationen innerhalb einer Fabrik eingesetzt werden. Für einen effizienten Einsatz muss ein Anwender das System selbstständig transportieren und vor Ort in Betrieb nehmen können.

Anforderung Transport: Transport und Aufbau des Augmented Reality-Systems sind durch eine Person einfach möglich.

Erlernbarkeit

Das zu entwickelnde Augmented Reality-System soll durch Benutzer aus unterschiedlichen Fachbereichen ohne spezielle Augmented Reality-Vorkenntnisse selbstständig eingesetzt werden. Im Rahmen eines effizienten Ressourceneinsatzes ist die Erlernbarkeit der Systembedienung von hoher Bedeutung (vgl. Abschnitt 3.4). Gute Erlernbarkeit bedeutet, dass der Umgang mit dem System

einfach verstanden werden kann und sich somit schnell gute Arbeitsergebnisse erzielen lassen.

Anforderung Erlernbarkeit: Der Umgang mit dem Augmented Reality-System kann auch durch ungeübte Anwender schnell erlernt werden.

Benutzererlebnis

Ein Grund für die geringe Verbreitung von Augmented Reality zur geometrischen Analyse in der Produktentstehung ist die mangelnde Akzeptanz der Anwender (vgl. Abschnitt 3.4). Daher muss die Benutzung des zu entwickelnden Augmented Reality-Systems zufriedenstellend möglich, also frei von Beeinträchtigungen sein. Die Zufriedenstellung der Anwender lässt sich übergeordnet durch ein positives Benutzererlebnis charakterisieren.

Anforderung Benutzererlebnis: Das Augmented Reality-System bietet ein positives Benutzererlebnis.

Damit sind auch die nicht-funktionalen Anforderungen an das zu entwickelnde Augmented Reality-System bekannt und können bei der weiteren Ausgestaltung im Rahmen des menschenzentrierten Gestaltungsprozesses berücksichtigt und verfeinert werden.

4.3 Anforderungsanalyse

Nicht jede Anforderung ist für jede technische Komponente des Augmented Reality-Systems relevant. Tabelle 4.1 zeigt eine Gegenüberstellung zwischen den im vorigen Abschnitt identifizierten Anforderungen und den vier typischen Komponenten eines optischen Augmented Reality-Systems (vgl. Abschnitt 2.2.2). Je nach Einfluss einer Anforderung auf eine technische Komponente ist das entsprechende Schnittfeld mit einem ● (Anforderung hat Einfluss auf Komponente) oder einem ○ (Anforderung hat keinen Einfluss auf Komponente) gekennzeichnet.

	Anforderung	Tracking- system	Visualisierungs- system	Eingabe- gerät	EDV- System
funktional	Kalibrierung	●	●	○	●
	Datenvorbereitung	○	○	○	●
	Ausrichtung	●	○	○	●
	Bewegung	●	○	○	●
	Darstellung	○	●	○	●
	Transformation	○	○	○	●
	Vermessung	●	○	○	●
	Dokumentation	○	○	○	●
nicht- funktional	Arbeitsraum	●	●	○	●
	Genauigkeit	●	●	○	●
	Zeitaufwand	●	○	○	●
	Kosten	●	●	●	●
	Transport	●	●	●	●
	Erlernbarkeit	●	●	●	●
	Benutzererlebnis	●	●	●	●

● Anf. beeinflusst Komponente ○ Anf. beeinflusst Komponente nicht

Tabelle 4.1: Einfluss der Anforderungen auf die Systemkomponenten

Eine **Kalibrierung** muss bei den meisten Augmented Reality-Systemen während der initialen Inbetriebnahme z. B. für das Tracking- oder das Visualisierungssystem vorgenommen werden. Zusätzlich ist die Kalibrierung bei der Ausgestaltung der EDV-Software zu berücksichtigen. Die **Datenvorbereitung** ist lediglich von der Umsetzung des EDV-Systems abhängig. Die Berechnung der Darstellung der virtuellen 3D-Modelle erfolgt durch die EDV-Software. Diese muss entweder das zur Verfügung gestellte Datenformat beherrschen, oder es muss eine geeignete Konvertierungsmöglichkeit bereitgestellt werden. Die Datenversorgung soll einerseits über das PDM-System möglich sein, hierzu muss das EDV-System ins Unternehmensnetzwerk eingebunden werden können. Andererseits soll eine Versorgung auch von externen Datenträgern möglich sein, hierzu muss die EDV-Hardware geeignete Schnittstellen zur Verfügung stellen. Die **Ausrichtung** auf Bohrungen, Kanten, Ecken und Punkte ist bei der Ausgestaltung des Trackingsystems zu berücksichtigen und muss außerdem in der EDV-Software abgebildet werden. Die **Bewegung** von Untersuchungsobjekten ist ebenfalls bei der Auswahl des Trackingsystems sowie der Umsetzung in der EDV-Software zu beachten. Die **Darstellung** der virtuellen Objekte z. B. als Voll-, Schnitt- oder Verdeckungsgeometrie wird durch die EDV-Software berech-

net und über das Visualisierungssystem dargestellt. Die **Vermessung** soll zur tieferehenden Analyse sowohl von physischen als auch von virtuellen Objekten möglich sein. Die Vermessung von physischen Objekten wird im einfachsten Fall mithilfe des Trackingsystems durchgeführt, prinzipiell ist aber auch der Einsatz zusätzlicher Messtechnik möglich. Die Vermessung von virtuellen Objekten muss durch die eingesetzte EDV-Software unterstützt werden. Die **Dokumentation** wird ebenfalls maßgeblich durch die Umsetzung innerhalb der Software definiert. Der **Arbeitsraum** eines Augmented Reality-Systems wird hauptsächlich durch das eingesetzte Trackingsystem sowie die Umsetzung des Trackings in der EDV-Software bestimmt. Aber auch die Wahl des Visualisierungssystems hat Einfluss auf den Arbeitsraum, schließlich kann z. B. ein örtlich feststehender Monitor nicht aus jedem Winkel und jeder Entfernung problemlos abgelesen werden. Um eine hohe **Genauigkeit** der Überlagerung von physischen und virtuellen Objekten zu erreichen, muss der Abbildungsvorgang vom physischen Modell auf das zur Darstellung der virtuellen Inhalte genutzte Visualisierungssystem möglichst genau beschrieben werden können (vgl. Abschnitt 2.2.3). Die erreichbare Überlagerungsgenauigkeit wird damit hauptsächlich durch das Tracking- und das Visualisierungssystem bestimmt, aber auch die zur Darstellung der virtuellen Elemente genutzte EDV-Software hat Einfluss auf die Überlagerungsgenauigkeit. Der **Zeitaufwand** für die Einrichtung und die Durchführung einer Analyse wird durch den gewählten Trackingansatz und die davon abhängige Umsetzung der Ausrichtung auf die physische Umgebung bestimmt. Ebenso muss die Augmented Reality-Software ein möglichst aufwandsarmes Arbeiten unterstützen. Die **Kosten** des Augmented Reality-Systems werden durch die Summe der Kosten der einzelnen Komponenten bestimmt. Der **Transport** des Augmented Reality-Systems ist dann einfach möglich, wenn Gewicht und Abmaße der einzelnen Komponenten möglichst gering sind. Die **Erlernbarkeit** und das **Benutzererlebnis** des zu entwickelnden Augmented Reality-Systems haben mit allen Komponenten starke Wechselwirkungen und lassen sich nicht auf einzelne Systembausteine reduzieren. Sie hängen stark von der Ausgestaltung des Gesamtsystems sowie der Umsetzung der zugehörigen Prozesse ab.

4.4 Zusammenfassung

Das zu entwickelnde Augmented Reality-System soll für Umfeld- und Qualitätsanalysen in der Produkt- und Produktionssystementwicklung eingesetzt werden. Die potenziellen Anwender sind typische Mitarbeiter aus den beiden genannten Bereichen. Sie haben Erfahrung im Umgang mit Computern, Tabletcompu-

tern und Smartphones, jedoch keine tiefergehenden Kenntnisse im Umgang mit der Technologie Augmented Reality. Mögliche Untersuchungsobjekte sind auf Produktseite einzelne Bauteile, Baugruppen oder das Gesamtprodukt, auf Produktionssystemseite Arbeitsstationen, Betriebsmittel oder das Produkt in seinem jeweiligen Aufbauzustand innerhalb einer Arbeitsstation. Als wesentliche Anforderungen an das zu entwickelnde Augmented Reality-System sind neben der benötigten Überlagerungsgenauigkeit und dem erforderlichen Arbeitsraum eine einfache Erlernbarkeit sowie ein durchgängiges und positives Benutzererlebnis hervorzuheben. Die Anforderungen beeinflussen die einzelnen Komponenten des zu entwickelnden Augmented Reality-Systems unterschiedlich stark. Die Überlagerungsgenauigkeit und der Arbeitsraum werden besonders durch das Trackingsystem bestimmt, die Erlernbarkeit und das Benutzererlebnis hängen stark von der Ausgestaltung des Gesamtsystems sowie der zugehörigen Prozesse ab.

5 Umsetzung

Dieses Kapitel beschreibt die Erarbeitung von Gestaltungslösungen zur Erfüllung der Nutzungsanforderungen und damit die dritte Phase des menschenzentrierten Gestaltungsprozesses zur Entwicklung eines gebrauchstauglichen Augmented Reality-Systems (vgl. Abschnitt 2.3.3). Zunächst werden die im vorigen Kapitel formulierten Anforderungen in ein Grobkonzept für das Gesamtsystem überführt. Anschließend werden die einzelnen technischen Komponenten sowie die aus Nutzersicht erforderlichen Tätigkeiten detailliert ausgestaltet, um darauf aufbauend einen für den Anwender durchgängigen und einfach erlernbaren Gesamtprozess definieren zu können.

5.1 Konzeption

Die im vorigen Kapitel formulierten Anforderungen wurden bereits grob auf die einzelnen Systemkomponenten aufgeteilt (vgl. Abschnitt 4.3). Auf dieser Basis wird im Folgenden die Auswahl der konkreten Systembausteine getroffen. Da die beiden Anforderungen Erlernbarkeit und Benutzererlebnis stärker von der Ausgestaltung des Gesamtprozesses als von der Auswahl der einzelnen Komponenten abhängen, werde sie bei der Komponentenauswahl vorerst nicht berücksichtigt. Stattdessen sollen sie anschließend durch eine Strukturierung des Benutzerprozesses sowie eine geeignete Benutzerführung erfüllt werden.

5.1.1 Trackingsystem

Von den möglichen Trackingansätzen (vgl. Abschnitt 2.2.2) werden für Augmented Reality-Systeme zur geometrischen Analyse hauptsächlich solche mit optischem, mechanischem oder Lasertracking eingesetzt (vgl. Abschnitt 3.3). Inertiales, laufzeitbasiertes und magnetisches Tracking werden aufgrund der im Kontext einer geometrischen Analyse geforderten Überlagerungsgenauigkeit höchstens in Kombination mit z. B. einem optischen Tracking als hybride Trackingsysteme genutzt. In diesem Fall übergibt der ungenauere Tracker eine grobe

initiale Orientierung als Startwert zur weiteren Optimierung an den genaueren optischen Tracker. Inertial-, laufzeitbasiertes und magnetisches Tracking werden daher im Folgenden nicht weiter betrachtet.

Bewertung Trackingsysteme

Tabelle 5.1 stellt die für das Tracking relevanten Anforderungen den in Frage kommenden Trackingmethoden gegenüber. Die Erfüllung der Anforderungen durch die einzelnen Trackingansätze wurde mit einem ● (Anforderung erfüllt), einem ◐ (Anforderung teilweise erfüllt) oder einem ○ (Anforderung nicht erfüllt) bewertet.

Anforderung	Inside-out Marker	Outside-in Marker	Markerlos	Mechanisch	Laser
Kalibrierung	●	●	●	●	●
Ausrichtung	●	●	○	●	●
Bewegung	●	●	◐	○	●
Vermessung	●	●	○	●	●
Arbeitsraum	●	●	●	○	●
Genauigkeit	◐	●	○	●	●
Zeitaufwand	●	●	●	●	●
Kosten	●	○	●	○	○
Transport	●	○	●	◐	◐

● Anforderung erfüllt ◐ Anforderung teilweise erfüllt ○ Anforderung nicht erfüllt

Tabelle 5.1: Vergleich der Trackingmethoden

Für das *Inside-out-Markertracking* werden häufig quadratische Marker eingesetzt (vgl. Abschnitt 3.3.1). Bei diesen Systemen ist zunächst eine Kalibrierung der für das Tracking eingesetzten Videokamera durchzuführen. Hierzu existieren mit der Labor-, der Testfeld- und der Simultankalibrierung eine Reihe geeigneter Methoden (vgl. Abschnitt 2.2.3). Die Ausrichtung auf geometrische Elemente wie Punkte, Linien oder Flächen eines physischen Untersuchungsobjektes ist z. B. mithilfe von geometrischen Adaptern einfach möglich und verursacht nur einen geringen Zeitaufwand. Auf diese Weise lässt sich auch eine Vermessung physischer Objekte umsetzen. Das Tracking mehrerer bewegter Objekte ist möglich, wenn jedes Objekt durch eigene Marker signalisiert wird. Der Arbeitsraum des Inside-out-Markertrackings lässt sich durch die Verwendung zusätzlicher Marker beliebig erweitern, sodass die Abdeckung einer vollständigen Arbeitsstation unproblematisch ist. Der Fehler des Inside-out-Quadratmarkertrackings nimmt

jedoch mit wachsendem Arbeitsabstand zu, sodass die geforderte Überlagerungsgenauigkeit von einem Millimeter nicht über den gesamten Arbeitsraum garantiert werden kann [Pen09] [PMK06]. Da für den Betrieb eines Inside-out-Quadratmarkertrackings kaum spezielle Hardware benötigt wird und diverse freie Implementierungen zur Verfügung stehen, fallen die Kosten aber sehr niedrig aus. Die für den Betrieb benötigte Kamera sowie die Quadratmarker lassen sich, abhängig von der Markergröße, platzsparend in einem Koffer unterbringen und dementsprechend einfach transportieren.

Für das *Outside-in-Markertracking* werden häufig retroreflektive Baummarker eingesetzt, welche über Infrarotkameras getrackt werden (vgl. Abschnitt 3.3.2). Zunächst sind die Abbildungseigenschaften der Infrarotkameras zu kalibrieren. Dies geschieht jedoch in der Regel vor der Auslieferung durch den Hersteller. Würden die Infrarotkameras in der Umgebung positioniert, muss deren relative Lage zueinander bestimmt werden. Dies kann einfach realisiert werden, indem z. B. ein Stab mit darauf angebrachten Infrarotmarkern durch den Untersuchungsraum bewegt wird. Aus den Beobachtungen der Marker durch die einzelnen Kameras kann deren relative Lage zueinander abgeschätzt werden. Die Lage der Marker gegenüber der verwendeten Kamera oder dem Head-mounted-Display muss ebenfalls kalibriert werden, was z. B. mithilfe eines zusätzlichen Inside-out-Markertrackings realisiert werden kann. Die Ausrichtung des Outside-in-Markertrackingsystems sowie die Vermessung von geometrischen Elementen sind, genau wie beim Inside-out-Markertracking, einfach über geometrische Adapter möglich. Mithilfe mehrerer Marker lassen sich Bewegungen verschiedener Objekte gleichzeitig verfolgen. Der Arbeitsraum kann, ebenso wie die erreichbare Systemgenauigkeit, durch Hinzunehmen weiterer Kameras gesteigert werden. Die Einrichtung ist durch die Verwendung der Adapter relativ schnell möglich. Die Anschaffungskosten sind allerdings aufgrund der benötigten Infrarotkameras sehr hoch. Theoretisch ist der Transport durch den Einsatz von Stativen, auf welchen die Kameras angebracht werden, möglich. Da für ein robustes und hinreichend genaues Tracking allerdings mehrere Kameras und damit auch Stative benötigt werden, ist der Transport durch eine einzelne Person nicht einfach möglich.

Für ein *markerloses Tracking* müssen in der Regel zunächst die Abbildungseigenschaften der verwendeten Kamera bestimmt werden (vgl. Abschnitt 2.2.3). Die Ausrichtung über konkrete geometrische Elemente wie Bohrungen oder Passstifte ist meistens nicht einfach möglich, da die benötigten Referenzelemente häufig nicht als eigenständige Features erkannt und somit auch nicht direkt referenziert werden können. Aus diesem Grund ist oft eine manuelle Ausrichtung durch den Anwender notwendig [CMP⁺06]. Das Tracking mehrerer

bewegter Objekte ist mit markerlosen Systemen zumeist ebenfalls nicht einfach möglich, da die getrackten Featurepunkte häufig als ortsfest angenommen werden [KM07] und dadurch keinen einzelnen Objekten zugeordnet werden können. Markerloses Tracking lässt sich theoretisch in beliebig großen Räumen einsetzen, wenn ausreichend große Featuremaps erstellt werden können. Die erreichbare Überlagerungsgenauigkeit ist sehr stark von den genutzten natürlichen Features sowie der Umgebung abhängig und lässt nicht allgemein quantifizieren. Es kann aber angenommen werden, dass die erreichbare Genauigkeit unter der der übrigen betrachteten Trackingsysteme liegt. Der Zeitaufwand für Einrichtung und Durchführung wird maßgeblich durch die manuelle Ausrichtung des Featuretrackings bestimmt und wird auf einem ähnlichen Niveau wie beim Inside-out-Markertracking gesehen. Für den Betrieb eines markerlosen Trackingsystems sind lediglich eine Kamera sowie ein EDV-System notwendig, sodass die Kosten gering sind und die Systeme einfach transportiert werden können.

Für ein *mechanisches Tracking* werden im industriellen Kontext in der Regel Mehrgelenkmessarme eingesetzt (vgl. Abschnitt 3.3.3). Augmented Reality-Systeme mit Mehrgelenkmessarmen arbeiten nach dem Video-see-through-Prinzip. Neben der Kalibrierung der Abbildungseigenschaften der Kamera ist daher auch eine Kalibrierung der Lage der Kamera gegenüber der Messpistole des Arms erforderlich. Die Kalibrierung kann z. B. mithilfe eines Inside-out-Markertrackings durchgeführt werden. Die Ausrichtung auf physische Untersuchungsobjekte sowie deren Vermessung kann mithilfe der Messspitze des Arms einfach durchgeführt werden [Gei12]. Das Antasten der geometrischen Elemente mit dem Mehrgelenkmessarm ist relativ schnell möglich, sodass der Zeitaufwand für die Vorbereitung auf einem ähnlichen Niveau wie bei den optischen Trackern gesehen werden kann. Das Tracking bewegter Untersuchungsobjekte ist mit einem feststehenden Messarm nicht möglich, außerdem wird der Arbeitsraum durch die Länge der Armsegmente begrenzt. Dadurch kann es erforderlich sein, den Mehrgelenkmessarm während einer Untersuchung mehrfach umzusetzen, dann muss die Ausrichtung jedoch erneut durchgeführt werden. Die Ausrichtung ist zudem nur dann einfach möglich, wenn die erforderlichen Referenzelemente in Reichweite des Messarms liegen, was gerade bei Absicherungen z. B. in einer Arbeitsstation jedoch nicht immer gegeben ist. Die geforderte Überlagerungsgenauigkeit von einem Millimeter kann durch Augmented Reality-Systeme mit Mehrgelenkmessarmen durch eine entsprechend hochwertige Kalibrierung des Gesamtsystems erreicht werden [BGK13]. Mehrgelenkmessarme verursachen hohe Anschaffungskosten, der Transport durch eine einzelne Person ist eingeschränkt möglich.

Augmented Reality-Systeme mit **Lasertracking** arbeiten ebenso wie mess-armbasierte Systeme häufig nach dem Video-see-through-Prinzip (vgl. Abschnitt 3.3.4). Neben der Kalibrierung der Abbildungseigenschaften der Kamera muss daher beim Inside-out-Lasertracking die Lage der Kamera gegenüber dem Lasertracker, beim Outside-in-Lasertracking die Lage der Kamera gegenüber dem darauf angebrachten Lasermarker bestimmt werden. Beides kann mithilfe eines Quadratmarkertrackings durchgeführt werden. Aus der Literatur sind einerseits Systemlösungen bekannt, welche für die Ausrichtung auf den zeitintensiven Einsatz zusätzlicher Messtechnik wie etwa eines Theodoliten setzen [SM10]. Andererseits können die benötigten Referenzpunkte auch über Lasermarker signalisiert und vermessen werden [Bad12], was mit akzeptablem Zeitaufwand umsetzbar ist. Die Verfolgung von verschiedenen bewegten Objekten ist durch den Einsatz mehrerer Lasermarker möglich. Der Arbeitsraum des Lasertrackings ist sehr groß, die Systeme können teilweise mehrere hundert Quadratmeter abdecken [SM12]. Lasertracker ermöglichen Trackinggenauigkeiten von deutlich unterhalb eines Millimeters [FAR18], sodass bei entsprechender Kalibrierung des Gesamtsystems auch die Überlagerungsgenauigkeit von physischen und virtuellen Objekten ausreichend sein sollte. Die Anschaffungskosten für Lasertracker sind allerdings sehr hoch. Der Transport ist aufgrund des Gewichts sowie der Abmaße des Lasertrackers durch eine Person zumindest eingeschränkt möglich.

Auswahl Trackingsystem

Bei Betrachtung der Vor- und Nachteile der einzelnen Trackingansätze wird klar, dass keine Methode alle Anforderungen vollständig erfüllt. Das mechanische Tracking scheidet aus, da keine bewegten Untersuchungsobjekte getrackt werden können und der geforderte Arbeitsraum von der Größe einer Arbeitsstation nicht abgedeckt werden kann. Das markerlose Tracking scheidet ebenso aus, da die Referenzierung auf Ecken, Bohrungen und Kanten nicht bzw. nur mit manuellem Aufwand möglich ist und die geforderte Genauigkeit nicht erreicht wird. Das Outside-in-Markertracking mit Infrarotkameras und das Lasertracking verursachen hohe Kosten, zudem ist der Transport durch eine Person nicht bzw. nur mit hohem Aufwand möglich.

Das Inside-out-Markertracking scheint die Anforderungen insgesamt am ehesten zu erfüllen, wobei die aus der Literatur bekannten Umsetzungen für Augmented Reality-Systeme die notwendige Genauigkeit nicht über den gesamten Arbeitsraum garantieren können. Allgemein muss für ein möglichst genaues Markertracking der optische Abbildungsvorgang der Marker durch das Objektiv auf den Bildsensor der Kamera sehr genau beschrieben werden. Hier besteht eine starke thematische Überschneidung mit einem Teilbereich der industriellen

Messtechnik, der Nahbereichsphotogrammetrie. Die hochgenaue Bestimmung von Kamerakalibrierung und Kameraorientierung im Rahmen einer sogenannten Bündelblockausgleichung ist ein Standardverfahren der photogrammetrischen Messtechnik [Luh10] [God93] [Bro66] und verspricht auch für hochgenaue Augmented Reality-Überlagerungen großes Potenzial. Zur näheren Erläuterung wird das kommerziell verfügbare System MoveInspect DPA der Firma AICON in Abbildung 5.1 betrachtet. Es besteht aus einer hochauflösenden Spiegelreflexkamera mit Blitzlicht, codierten und dadurch eindeutig identifizierbaren optischen Kreismessmarken, Adaptern zur Signalisierung von z. B. Bohrungen, Ecken oder Kanten, kalibrierten Maßstäben sowie einem photogrammetrischen Softwarepaket, welches z. B. auf einem Laptop betrieben wird. Die im photogrammetrischen System verwendete Bildverarbeitungsalgorithmik und die Bündelblockausgleichung sind im Rahmen der kommerziellen Softwarebibliothek AICON DPA DLL verfügbar und können so in das zu entwickelnde Augmented Reality-System integriert werden.



Abbildung 5.1: Photogrammetrisches Messsystem [AIC17]

Die Methoden und Komponenten des photogrammetrischen Messsystems lassen sich in zweierlei Hinsicht für den Augmented Reality-Einsatz nutzen: Einerseits kann eine z. B. für ein Quadratmarkertracking verwendete Videokamera durch

das detaillierte Kameramodell genau beschrieben und durch die eingesetzten Bildverarbeitungsmethoden und den Bündelblockausgleich robust kalibriert werden. Dadurch kann eine optimale Ausgangsbasis für optische Inside-out-Tracker geschaffen werden. Andererseits lassen sich die Komponenten des photogrammetrischen Systems auch für das Tracking selbst einsetzen. Die Bildaufnahme wird dann z. B. mit der hochauflösenden Spiegelreflexkamera oder mit der für das Quadratmarkertracking verwendeten Videokamera durchgeführt, die Kreismarker, Adapter und Maßstäbe signalisieren das Untersuchungsobjekt und die Bildverarbeitung sowie die Bündelblockausgleichung aus der photogrammetrischen Software kommen für die Bestimmung der Kameraorientierungen der aufgenommenen Bilder zum Einsatz. Die vom Hersteller angegebene Messgenauigkeit des zertifizierten Gesamtsystems beträgt $3\ \mu\text{m} + 3\ \mu\text{m}/\text{m}$ (3 Sigma) [AIC17]. Zwar kann dieser Wert nicht mit der erreichbaren Überlagerungsgenauigkeit von physischen und virtuellen Objekten gleichgesetzt werden, jedoch sollte eine deutlich genauere Lagebestimmung als mit den üblicherweise für Augmented Reality-Systeme eingesetzten Trackingmethoden möglich sein. Damit lassen sich die photogrammetrischen Methoden und Algorithmen zur Kamerakalibrierung, zum Tracking oder für messtechnische Aufgaben nutzen.

Das Kreismarkertracking mithilfe des photogrammetrischen Messsystems ermöglicht zwar eine sehr hohe Überlagerungsgenauigkeit, hat gegenüber dem Quadratmarkertracking allerdings zwei entscheidende Nachteile: Einerseits ist die Anschaffung sowohl der Hardware als auch der Software des Systems mit hohen Kosten verbunden. Da die geforderte Überlagerungsgenauigkeit von einem Millimeter nicht für alle Anwendungen benötigt wird, lässt sich der Einsatz des photogrammetrischen Messsystems gegenüber einem deutlich günstigeren Quadratmarkertracking nicht immer rechtfertigen. Andererseits benötigen die Bildverarbeitungsalgorithmen und die Bündelblockausgleichung verglichen mit einem Quadratmarkertracking sehr viel Rechenleistung, sodass das Tracking nur mit einer sehr niedriger Frequenz durchgeführt werden kann. Für einen Echtzeiteinsatz ist es daher weniger geeignet. Aus diesem Grund wird für das zu entwickelnde Augmented Reality-System neben dem photogrammetrischen Kreismarkertracking zusätzlich ein Quadratmarkertracking umgesetzt, wobei die beiden Tracker unabhängig voneinander oder gemeinsam verwendet werden können. Benötigt ein Anwender keine hochgenauen Überlagerungen, kann das Tracking lediglich über die Quadratmarker realisiert werden. Dadurch fallen die hohen Anschaffungskosten des photogrammetrischen Systems weg. Wird jedoch eine hohe Genauigkeit gefordert, kann die Analyse einerseits auf Basis von Fotos mithilfe des Kreismarkertrackings durchgeführt werden. Andererseits ist auch ein hybrides Tracking sowohl der Kreis- als auch der Quadratmarker möglich.

Dann kann während der Live-Analyse das ungenauere aber echtzeitfähige Quadratmarkertracking genutzt werden. Sobald eine Perspektive genauer untersucht werden soll, kann das Live-Bild pausiert und im Hintergrund automatisch das genauere Kreismarkertracking durchgeführt werden. Das überlagerte Standbild lässt sich dann für eine genauere Analyse verwenden. Die beiden Tracker arbeiten auf diese Weise in Form eines hybriden Trackings nahtlos zusammen. Dadurch können die Vorteile des echtzeitfähigen Quadratmarkertrackings sowie des hochgenauen Kreismarkertrackings miteinander kombiniert und die Nachteile beider Ansätze optimal kompensiert werden.

Das Quadratmarkertracking wird mithilfe der ArUco-Bibliothek umgesetzt [GMM⁺14]. Zur vollständigen Lagebestimmung der Kamera reicht bereits ein einzelner sichtbarer Quadratmarker aus, dessen metrische Kantenlänge bekannt ist. Um die Trackinggenauigkeit des Quadratmarkersystems zu erhöhen, wird im zu entwickelnden Augmented Reality-System nicht nur ein einzelner Marker für die Lagebestimmung der Kamera verwendet. Stattdessen wird die Kamerelage über alle im Kamerabild sichtbaren Marker abgeschätzt. Diese Optimierung wirkt sich positiv auf Stabilität, Robustheit und Genauigkeit aus. Das ArUco-Quadratmarkertracking wird außerdem dahingehend ergänzt, dass zur Ausrichtung auf Untersuchungsobjekte geometrische Adapter mit beliebig definierbaren rotatorischen und translatorischen Freiheitsgraden verwendet werden können. Abbildung 5.2 zeigt in diesem Zusammenhang ein Konzeptmodell der Markeradapter. Der Marker wird mithilfe eines Ringmagneten auf einem Zwischenadapter



Abbildung 5.2: Konzeptmodell Markeradapter [Jer16]

fixiert, welcher seinerseits auf ein Drei-Backen-Handspannfutter geschraubt wird. Über das Handspannfutter lässt sich der Adapter auf Bohrungen, Bolzen und Absteckern unterschiedlichen Durchmessers fixieren. Zusätzlich kann ein weiteres Zwischenstück verwendet werden, falls das Umfeld ein Anbringen des Markers erschwert. Durch das modulare Konzept können Marker unterschiedlicher Größe mit denselben Adaptern genutzt werden, außerdem ist so ein platzsparender Transport von Markern und Markeradaptern möglich.

5.1.2 Visualisierungssystem

Zur Visualisierung der virtuellen Umfänge können Optical-see-through- oder Video-see-through-Head-mounted Displays, projektorbasierte Systeme, stationäre oder mobile Displays eingesetzt werden (vgl. Abschnitt 2.2.2).

Bewertung Visualisierungssysteme

Tabelle 5.2 stellt die verschiedenen Visualisierungssysteme den relevanten Anforderungen gegenüber.

Anforderung	OST HMD	VST HMD	Projektor	Display stationär	Display mobil
Kalibrierung	◐	●	●	●	●
Darstellung	◐	●	◐	●	●
Arbeitsraum	●	●	◐	◐	●
Genauigkeit	○	●	●	●	●
Kosten	◐	◐	◐	●	●
Transport	●	●	●	○	●

● Anforderung erfüllt ◐ Anforderung teilweise erfüllt ○ Anforderung nicht erfüllt

Tabelle 5.2: Vergleich der Visualisierungsmethoden

Bei *OST-HMDs* muss für eine genaue Überlagerung von virtuellen und physischen Umfängen die relative Bewegung zwischen den semitransparenten Displays und den Augen des Betrachters bestimmt werden. Zwar existieren für diese Kalibrierung schon einige Ansätze [IK14], jedoch ist die erreichbare Überlagerungsgenauigkeit für geometrische Analysen heute noch nicht ausreichend. Zudem kann die Darstellung der virtuellen Elemente aufgrund der stets durchscheinenden Realität unter ungünstigen Lichtbedingungen problematisch sein. Die Anschaffungskosten von OST-HMDs können im Vergleich zu den übrigen

Visualisierungssystemen im mittleren Bereich eingestuft werden. Die Anforderungen bezüglich Arbeitsraum sowie Transport werden dagegen als erfüllt betrachtet.

Bei **VST-HMDs** ist eine Kalibrierung der Videokamera erforderlich, deren Bild auf das VST-Display übertragen wird. Hierzu existieren verschiedene ausgereifte Methoden (vgl. Abschnitt 2.2.3), durch welche die geforderte Überlagerungsgenauigkeit von physischen und virtuellen Objekten erreicht werden kann. Die Kosten werden, ebenso wie bei OST-HMDs, im mittleren Bereich gesehen. Die Darstellung der virtuellen Umfänge sowie der Transport und der Arbeitsraum sind ebenfalls unproblematisch.

Wird ein **Projektor** zur Visualisierung verwendet, müssen dessen Abbildungseigenschaften im Rahmen einer Kalibrierung ermittelt werden. Für diesen Prozess existieren geeignete Ansätze [AO09], über welche eine ausreichende Genauigkeit gewährleistet werden kann. Die aussagekräftige Darstellung der virtuellen Elemente kann bei projektorbasierten Systemen z. B. aufgrund spiegelnder Oberflächen allerdings problematisch sein. Projektoren werden häufig örtlich feststehend eingesetzt, sie decken daher nur den Arbeitsraum in ihrer Blickrichtung ab und werden zusätzlich durch Hinterschneidungen behindert. Die Anschaffungskosten für Projektoren werden im mittleren Bereich gesehen. Der Transport ist durch eine einzelne Person unproblematisch möglich.

Stationäre und mobile Displays arbeiten wie auch VST-HMDs nach dem Video-see-through-Prinzip, sodass die Anforderungen Kalibrierung, Darstellung und Genauigkeit gleichsam erfüllt werden. Stationäre Displays schränken den Arbeitsraum allerdings dahingehend ein, dass sie nicht aus jeder Blickrichtung und Entfernung abgelesen werden können. Die Kosten für stationäre und mobile Displays sind vergleichsweise gering. Der Transport durch eine Person ist besonders bei größeren stationären Displays nur schwierig möglich.

Auswahl Visualisierungssystem

Da die Kalibrierung von OST-HMDs und damit die Sicherstellung der geforderten Genauigkeit problematisch ist, werden diese ausgeschlossen. Stationäre Displays eignen sich bei entsprechender Größe nicht für den Transport durch eine Person, sodass auch sie ausscheiden. Der Einsatz von Projektoren ist ebenfalls nicht zielführend, da die Anforderungen bezüglich Darstellung und Arbeitsraum nur teilweise erfüllt werden. VST-HMDs sowie mobile Displays erfüllen auf den ersten Blick alle geforderten Anforderungen und sind damit für den Einsatz im zu entwickelnden Augmented Reality-System geeignet. Da bei VST-HMDs allerdings die Orientierung in der physischen Umgebung erschwert

ist und Fragestellungen zu Gewicht, Sichtfeld sowie Stromversorgung ebenfalls eine Rolle spielen, soll für das zu entwickelnde Augmented Reality-System ein mobiles Display eingesetzt werden.

5.1.3 Eingabegerät

Zur Interaktion mit einem Augmented Reality-System können theoretisch taktile Eingabegeräte wie Computertastatur oder -maus, Touchscreens, optische Eingabegeräte z. B. mithilfe von Markern, Motion Capturing-Ansätze oder Spracheingaben verwendet werden (vgl. Abschnitt 2.2.2). Optische sowie Motion Capturing-Ansätze und sprachliche Eingaben sind aufgrund der Art und Komplexität der erforderlichen Eingaben z. B. zur Ausrichtung des Tracking-systems nicht zielführend und können direkt ausgeschlossen werden. Taktile Eingabegeräte wie Computertastaturen und -mäuse haben sich in der Praxis bewährt und werden von vielen potenziellen Benutzern bereits durch ihre tägliche Arbeit sowie ihren privaten Umgang mit Desktop-Computern und Laptops beherrscht und akzeptiert. Touchscreens sind vielen potenziellen Benutzern durch den privaten sowie beruflichen Umgang mit Smartphones und Tabletcomputern ebenfalls geläufig. Die Anschaffung ist insgesamt kostengünstig und der Transport einfach möglich.

5.1.4 EDV-System

EDV-Systeme bestehen aus Hard- und Softwarekomponenten. Die Hardware bestimmt maßgeblich die Rechenleistung des Augmented Reality-Systems, ihr Gewicht und ihre Abmessungen sind zudem für einen einfachen Transport relevant. Die EDV-Software besitzt in Form der zu entwickelnden Augmented Reality-Anwendung Wechselwirkungen mit sämtlichen Anforderungen.

EDV-Hardware

EDV-Hardware kann in stationäre, mobile und hybride Systeme unterschieden werden (vgl. Abschnitt 2.2.2). Während stationäre Systeme zwar eine hohe Leistung zur Verfügung stellen können, sind sie ihrem Namen gemäß jedoch lediglich für den stationären Einsatz ausgelegt. Demgegenüber verhält es sich bei mobilen Lösungen genau umgekehrt. Sie sind einfach transportabel, haben aber eine im Vergleich zu stationären Systemen geringere Leistung. Hybride Systeme versuchen dieses Dilemma zu lösen, indem der Anwender zwar mit einem mobilen Gerät arbeitet, aufwendige Berechnungen aber auf ein stationäres

EDV-System ausgelagert werden. Dafür muss jedoch immer eine Verbindung zwischen dem mobilen Client und dem stationären Server bestehen, was gerade bei Augmented Reality-Analysen im Fabrikumfeld oder bei Lieferanten nicht immer realisierbar ist.

Mobile Systemlösungen scheinen den gestellten Anforderungen insgesamt am ehesten zu genügen. Durch die mit jeder neuen Generation steigende Leistung sind moderne mobile Systeme heute in der Lage, komplexe Berechnungen durchzuführen und auch größere virtuelle 3D-Modelle zu visualisieren. Unter den mobilen Systemen sind Tabletcomputer für den Augmented Reality-Einsatz besonders geeignet, da sie alle erforderlichen Komponenten in einer kompakten und besonders einfach handhabbaren Bauweise vereinen.

Zur näheren Erläuterung wird der in Abbildung 5.3 dargestellte Tabletcomputer betrachtet. Die im Tabletcomputer integrierte Videokamera kann für den Einsatz des markerbasierten Inside-out-Trackings verwendet werden. Das berührungsempfindliche Display, das etwa durch Finger oder spezielle Eingabestifte bedient werden kann, dient gleichzeitig der Interaktion sowie der Anzeige des überlagerten Videodatenstroms. Alternativ kann zur Interaktion eine andockbare Tastatur, z. B. für längere Text- oder Zahleneingaben, verwendet werden. Über das integrierte WLAN-Modul ist die drahtlose Versorgung mit den erforderlichen CAD-Dateien etwa aus dem im Unternehmen eingesetzten PDM-System möglich, zusätzlich lassen sich externe Datenträger über eine USB-Schnittstelle anschließen. Tabletcomputer stellen damit die ideale Hardwarebasis für die weitere Ausgestaltung des zu entwickelnden Augmented Reality-Systems dar.



Abbildung 5.3: Komponenten eines Tabletcomputers

EDV-Software

Augmented Reality-Software ist ein elementarer Bestandteil jedes Augmented Reality-Systems. Sie sollte Funktionen zur Kalibrierung, Datenvorbereitung, Ausrichtung und Tracking, Darstellung, Vermessung und Dokumentation zur Verfügung stellen und bestimmt dadurch in erheblichem Maße die nicht-funktionalen Eigenschaften Zeitaufwand, Erlernbarkeit und Benutzererlebnis. Für die Entwicklung von Augmented Reality-Software existiert eine Vielzahl unterschiedlicher Realisierungsmöglichkeiten. Es gibt Softwarebausteine, welche einzelne Komponenten wie z. B. die Kalibrierung, das Tracking, oder die Visualisierung bereitstellen. Diese Komponenten müssen mit mehr oder weniger großem Programmieraufwand zu einem Gesamtsystem zusammengefügt werden. Dafür bietet diese Form der Umsetzung eine vergleichsweise große Flexibilität. Andere Lösungen stellen die für einen Betrieb notwendigen Komponenten integriert zur Verfügung, die individuelle Anpassung einer solchen Applikation an die spezifischen Bedürfnisse oder die Einbindung zusätzlicher Komponenten ist für Systementwickler dafür nur schwer möglich oder gar nicht vorgesehen [BCL15].

Da die Augmented Reality-Software starke Wechselwirkungen mit sämtlichen Anforderungen an das Augmented Reality-System aufweist und sie für eine einfache Erlernbarkeit sowie ein positives Benutzererlebnis entsprechend ausgestaltet werden muss, wird eine individuelle Softwarelösung aus maßgeschneiderten Komponenten entwickelt. Die softwaretechnische Umsetzung des zu entwickelnden Augmented Reality-Systems erfolgt in enger Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für Graphische Datenverarbeitung (IGD) in Darmstadt. Die Basis für die Integration der einzelnen Softwaremodule bildet NW.js, welches sich aus Chromium und Node.js zusammensetzt [NW18] [Ben15]. Über den integrierten Paketmanager werden die in der Augmented Reality-Software verwendeten Module z. B. für das Tracking oder die Visualisierung verwaltet. Chromium beinhaltet die Rendering-Engine Blink, welche für die Darstellung der Inhalte in Form einer sogenannten Single Page Application genutzt wird. Die Umsetzung der Single Page Application erfolgt mithilfe von AngularJS. AngularJS ist ein Open-Source-Framework zur Entwicklung von Webapplikationen in HTML und JavaScript [AJS18]. Die Darstellung der 3D-Daten erfolgt mithilfe von webVis [BMP⁺15] und hare3D [SLT⁺15] auf Basis von WebGL [ML13]. Diese Visualisierungspipeline erlaubt die performante Darstellung auch größerer Datenmengen z. B. auf einem Tabletcomputer. Um die 3D-JT-Dateien in das von hare3D benötigte SRC-Format zu konvertieren, wird ein am Fraunhofer IGD entwickelter Transkodierservice verwendet. Die Kalibrierung der eingesetzten Kameras erfolgt mithilfe der AICON DPA DLL, ebenso werden

über diese Bibliothek das photogrammetrische Kreismarkertracking und die zugehörige Ausrichtung über Markeradapter implementiert. Für das Tracking von Quadratmarkern wird die ArUco-Bibliothek [GMM⁺14] eingesetzt. Die Ausrichtung der Quadratmarker mithilfe der zugehörigen Markeradapter wird über das am Fraunhofer IGD entwickelte instantreality-Framework umgesetzt. Da die konkrete technische Umsetzung kein Teil dieser Arbeit ist, sei für detailliertere Informationen zur Funktionsweise der einzelnen Komponenten auf die genannten Quellen verwiesen.

5.2 Benutzerprozess

Durch die in den vorigen Abschnitten ausgewählten Komponenten ergeben sich für Augmented Reality-Untersuchungen sowohl technische als auch nutzerbezogene Anforderungen an die Reihenfolge der einzelnen Prozessschritte. Die folgenden Abschnitte beschreiben die Modellierung des Gesamtprozesses sowie der untergeordneten Teilprozesse aus technischer Sicht. Um eine Basis für die anschließende Ausgestaltung der Benutzerführung zu schaffen, werden die Teilprozesse zeitlich sowie bezüglich des erforderlichen Fachwissens strukturiert und die Benutzer darauf aufbauend in zwei verschiedene Benutzergruppen eingeteilt.

5.2.1 Systemskizze

Aus den ausgewählten Systemkomponenten ergibt sich die in Abbildung 5.4 dargestellte Systemkonstellation. Während einer Live-Analyse bewegt sich der Anwender mit dem Tabletcomputer um das Untersuchungsobjekt herum. Über die im Tabletcomputer integrierte Kamera wird das Untersuchungsobjekt gefilmt und gemeinsam mit der Überlagerung der virtuellen Objekte auf dem Display dargestellt. Alternativ kann die Absicherung auch offline mithilfe einer Fotokamera durchgeführt werden. Die Marker sind über Adapter auf dem untersuchten physischen Objekt angebracht, zusätzlich können weitere Hilfsmarker zur Vergrößerung des Arbeitsraums in der Umgebung positioniert werden.

Für die Registrierung von physischen und virtuellen Objekten muss der Abbildungsvorgang eines Punktes des physischen Objektes auf den Bildsensor der Kamera bekannt sein. Die Transformation ${}^S\mathbf{T}_O$ vom Objekt auf den Bildsensor kann durch linksseitige Multiplikation der homogenen Transformationsmatrizen ${}^A\mathbf{T}_O$ vom Objekt zum Adapter ${}^M\mathbf{T}_A$, vom Adapter zum Marker ${}^K\mathbf{T}_M$, vom

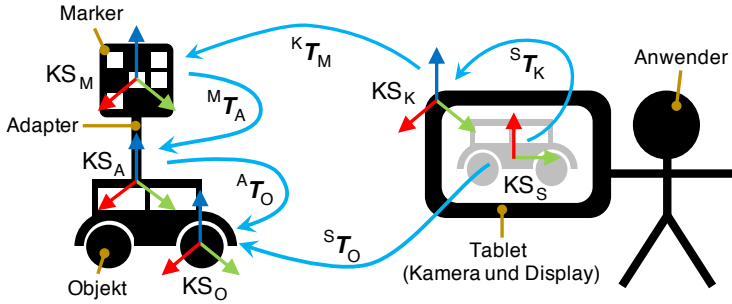


Abbildung 5.4: Prinzipskizze Gesamtsystem

Marker zur Kamera und ${}^S T_K$ von der Kamera auf den Sensor gebildet werden:

$${}^S T_O = {}^S T_K {}^K T_M {}^M T_A {}^A T_O. \quad (5.1)$$

Die Transformation ${}^S T_K$ wird im Rahmen einer Kamerakalibrierung mithilfe der Bündelblockausgleichung des photogrammetrischen Messsystems bestimmt. Die Transformation ${}^K T_M$ vom Marker zur Kamera kann entweder mithilfe des photogrammetrischen Kreismarkertrackings oder über das Quadratmarkertracking abgeschätzt werden. Die Transformation ${}^M T_A$ vom Adapter auf den Marker wird durch die Geometrie der Adapter definiert. Die Transformation ${}^A T_O$ vom untersuchten Objekt zum Adapter wird mithilfe der Koordinaten des durch den Adapter referenzierten Elementes am Untersuchungsobjekt gebildet. Damit sind alle Transformationen zur Abbildung eines 3D-Punktes des untersuchten Objektes auf das diskrete 2D-Pixelkoordinatensystem des Bildsensors der Kamera bekannt. Mithilfe dieser Informationen kann die perspektivisch korrekte Überlagerung der virtuellen Objekte auf das Kamerabild des Tabletcomputers berechnet werden.

5.2.2 Prozessmodelle

Abbildung 5.5 zeigt den Gesamtprozess einer Augmented Reality-Untersuchung. Technisch gesehen ist es nicht relevant, ob mit der Kalibrierung der Kamera, der Aufnahme der zu analysierenden Bilder oder der Vorbereitung der CAD-Daten begonnen wird. Die beiden Prozesse Kamera kalibrieren und Tracking

einrichten müssen aber ebenso wie die Bildaufnahme abgeschlossen sein, bevor das Tracking durchgeführt werden kann. Auf Basis eines getrackten und durch CAD-Daten überlagerten Bildes können die Analyse des Zusammenspiels der virtuellen und physischen Objekte sowie die Dokumentation der Ergebnisse durchgeführt werden.

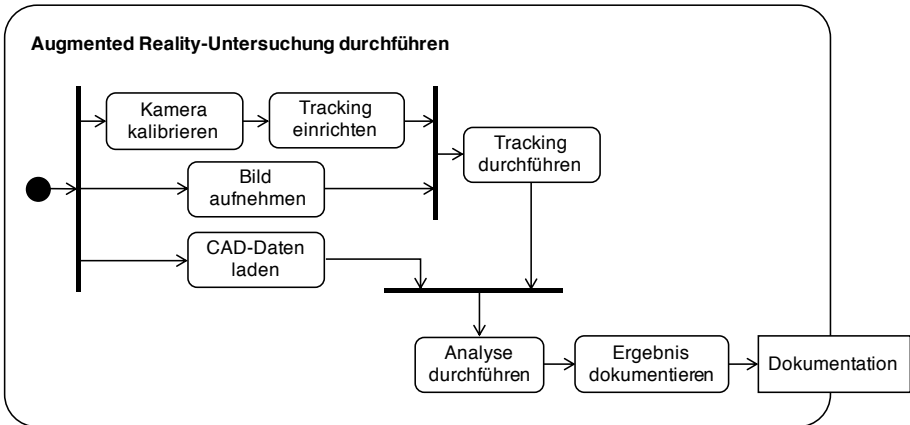


Abbildung 5.5: Gesamtprozess Augmented Reality-Untersuchung durchführen

Eine Analyse kann allgemein auf zwei verschiedene Arten erfolgen, entweder online anhand des Live-Bildes einer Videokamera oder offline anhand von im Vorfeld aufgenommenen Fotos oder Videos [Bad12]. In einer Online-Untersuchung bewegt sich der Anwender frei mit der Videokamera um ein Absicherungsobjekt herum und sieht das überlagerte Kamerabild unmittelbar auf dem Display des Tabletcomputers. Die Aufnahme der Bilder und das Tracking erfolgen kontinuierlich durch das System. Dementsprechend müssen die Kamerakalibrierung und die Einrichtung des Trackings bereits durchgeführt worden sein, bevor die Bildaufnahme und das Tracking stattfinden können. Bei der Offline-Untersuchung werden dagegen Bilder oder Videos verwendet, welche erst nach der Aufnahme ausgerichtet und mit virtuellen Objekten überlagert werden. Die Schritte Bild aufnehmen sowie Tracking einrichten und durchführen können in diesem Fall sowohl zeitlich als auch örtlich getrennt erfolgen.

Kamera kalibrieren

Für die Kamerakalibrierung mithilfe des photogrammetrischen Messsystems (vgl. Abschnitt 5.1.1) müssen zunächst die Sensorauflösung in Pixeln und die

Sensorgröße in Millimetern jeweils in x - und y -Richtung eingegeben werden. Aus den Kreismarken und den Maßstäben wird ein Kalibrierfeld aufgebaut. Die Positionen der Kreismarken zueinander müssen nicht bekannt sein, da mit der Bündelblockausgleichung bei ausreichender Anzahl an Beobachtungen die gleichzeitige Bestimmung sowohl der Kamerakalibrierung, der Kameraorientierungen, als auch der einzelnen Markerpositionen zueinander möglich ist.

Das Kalibrierfeld wird durch den Anwender aus verschiedenen Perspektiven abgelichtet. Anschließend werden durch die Bildverarbeitung des photogrammetrischen Systems die Markerpositionen in den einzelnen Bildern ermittelt und daraus auf Basis der Bündelblockausgleichung die unbekannt Parameter bestimmt. Abbildung 5.6 zeigt diesen Prozess aus Sicht des Anwenders. Die Schritte, bei welchen eine Anwenderinteraktion erforderlich ist, sind weiß hinterlegt, die Schritte, welche durch das Augmented Reality-System ohne zusätzliche Anwenderinteraktion durchgeführt werden können, sind grau hinterlegt.

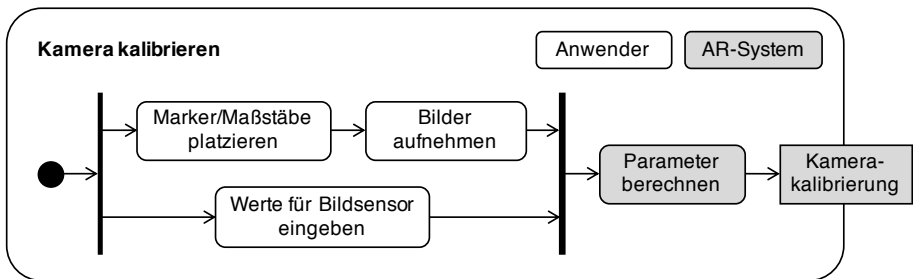


Abbildung 5.6: Aktivitätsdiagramm Kamera kalibrieren

Über das vorgestellte Kalibrierverfahren können sämtliche im Augmented Reality-System eingesetzten Foto- und Videokameras kalibriert werden. Das Kameramodell des photogrammetrischen Messsystems wird sowohl für die Entzerrung der zu überlagernden Bilder oder Videos als auch für die Parametrierung der virtuellen Kamera, welche die virtuelle Szene abbildet, eingesetzt. Die robuste und genaue Kamerakalibrierung mithilfe der Algorithmen und Methoden des photogrammetrischen Messsystems liefert eine solide Basis, um mit dem Augmented Reality-System möglichst genaue Überlagerungen zwischen virtuellen und physischen Objekten zu erstellen.

CAD-Daten laden

Die mithilfe des Augmented Reality-Systems zu visualisierenden virtuellen 3D-Daten liegen im PDM-System des Unternehmens im JT-Datenformat vor.

Datenzugriff und Verwaltung sind über ein entsprechendes Front-End mit diversen Such-, Filter- und Exportoptionen möglich. Alternativ können JT-Dateien über externe Datenträger bereitgestellt werden, was z. B. für die Versorgung mit Anlagen- oder Betriebsmitteldaten externer Lieferanten notwendig ist. Abbildung 5.7 stellt den Prozess zur Vorbereitung der CAD-Daten innerhalb des Augmented Reality-Systems dar. Der Anwender wählt die zu visualisierenden CAD-Daten in der Augmented Reality-Anwendung auf dem Dateisystem aus. Die gewählten JT-Datensätze werden anschließend automatisch in das vom Renderer benötigte SRC-Dateiformat konvertiert und stehen für Augmented Reality-Analysen zur Verfügung.

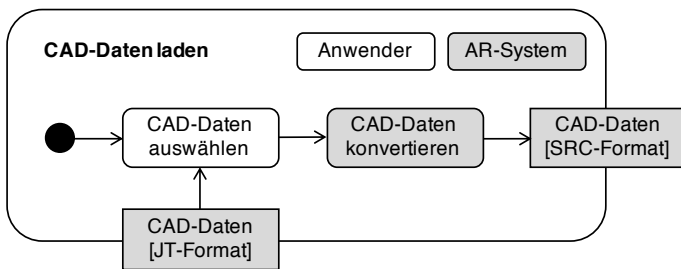


Abbildung 5.7: Aktivitätsdiagramm CAD-Daten laden

Tracking einrichten

Für das zu entwickelnde Augmented Reality-System sollen ein Kreismarkertracking mithilfe der Algorithmen und Methoden des photogrammetrischen Messsystems AICON DPA sowie ein Quadratmarkertracking mithilfe der ArUco-Bibliothek umgesetzt werden. Der Ausrichtungsprozess beider Tracker gestaltet sich bis auf einen Unterschied identisch: Beim Kreismarkertracking wird zur metrischen Skalierung der Strahlenbündel ein zum photogrammetrischen Messsystem gehörender Maßstab eingesetzt, während die Skalierung beim Quadratmarkertracking anhand der Kantenlänge der einzelnen Marker erreicht wird. Die Ausrichtung erfolgt in beiden Fällen über geometrische Adapter. Beim photogrammetrischen Messsystem werden die zugehörigen Marker und Adapter verwendet, deren Drei-Backen-Handspannfutter auch für die Quadratmarkeradapter entsprechend Abbildung 5.2 genutzt werden.

Der Prozess zur Einrichtung der beiden Markertrackingsysteme lässt sich weiter in die Konfiguration sowie die Ausrichtung unterteilen. Während der Konfiguration müssen entsprechend Abbildung 5.8 der durch die Geometrie der Adapter

beschriebene Offset zwischen Markern und Referenzelementen sowie im Falle des Kreismarkertrackings der Abstand der Messmarker auf dem Maßstab bzw. im Falle des Quadratmarkertrackings die Kantenlänge der Quadratmarker definiert werden.

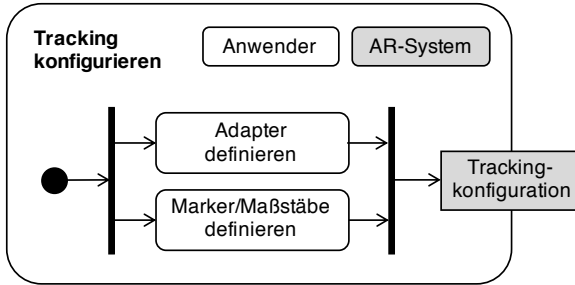


Abbildung 5.8: Aktivitätsdiagramm Tracking konfigurieren

Anschließend kann die Ausrichtung entsprechend Abbildung 5.9 durchgeführt werden. Zunächst sind Vorbereitungen am physischen Untersuchungsobjekt zu treffen. Dabei werden geometrische Elemente bekannter Position bzw. Lage wie Bohrungen, Ecken oder Kanten durch Adapter mit Markern signalisiert. Mithilfe zusätzlicher Marker in der Umgebung kann der Arbeitsraum flexibel erweitert werden. Für die Ausrichtung eines Bildes über das Kreismarkertracking sind mindestens vier Marker notwendig. Daher müssen die Kreismarker derart ange-

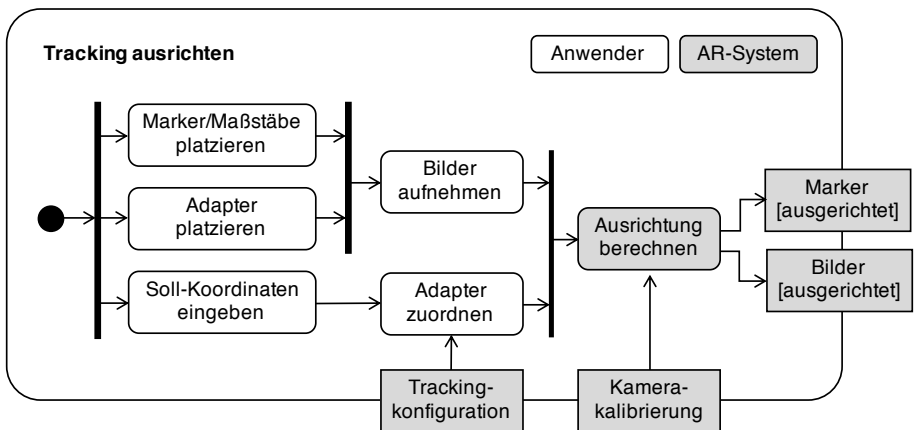


Abbildung 5.9: Aktivitätsdiagramm Tracking ausrichten

ordnet werden, dass bei jeder zu erwartenden Aufnahmeperspektive mindestens vier Marker gleichzeitig im Bild sichtbar sind. Für das Quadratmarkertracking reicht bereits ein einzelner Marker zur Ausrichtung eines Bildes aus. Das Verfahren wird allerdings robuster, je mehr Quadratmarker gleichzeitig sichtbar sind. Wurde das physische Untersuchungsobjekt mit Markern und Adaptern präpariert, können die Bilder zur Ausrichtung der Szene aufgenommen werden. In der Augmented Reality-Applikation müssen die zugehörigen Soll-Koordinaten der Adapter sowie die Aufteilung, welcher Marker welchem Adapter zugeordnet ist, definiert werden. Mit diesen Informationen kann unter Zuhilfenahme der Trackingkonfiguration sowie der Kamerakalibrierung die Ausrichtung der einzelnen Bilder und damit auch der Marker im Koordinatensystem des physischen Untersuchungsobjektes berechnet werden.

Tracking durchführen

Als Ergebnis der Ausrichtung sind einerseits die Kameralagen der für die Ausrichtung genutzten Einzelbilder im Koordinatensystem des Untersuchungsobjektes bekannt. Die Bilder können direkt für eine Offline-Überlagerung genutzt werden. Andererseits sind dadurch auch die Marker im Koordinatensystem des Untersuchungsobjektes ausgerichtet und können so für die automatische Bestimmung der Kameralage auf weiteren Bildern, in Videos oder im Live-Stream einer Kamera verwendet werden. Abbildung 5.10 zeigt das zugehörige Aktivitätsdiagramm des Markertrackings.

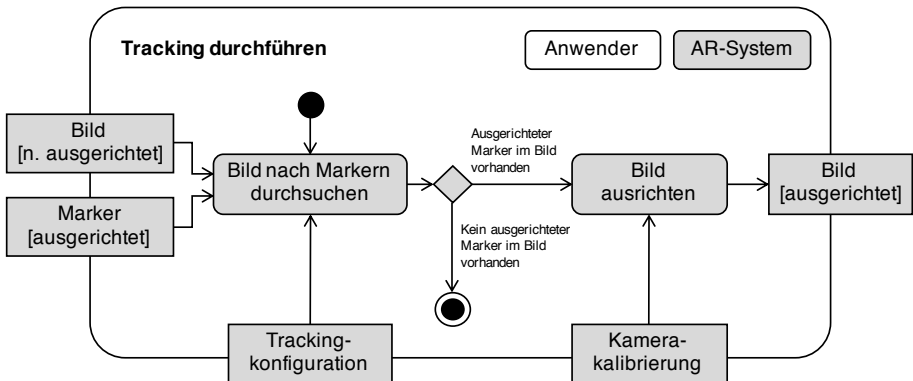


Abbildung 5.10: Aktivitätsdiagramm Tracking durchführen

Der gesamte Trackingprozess wird automatisch durch das Augmented Reality-System durchgeführt. Das System sucht in einem nicht ausgerichtetem Bild

mithilfe der Trackingkonfiguration nach ausgerichteten Markern. Wurden genügend ausgerichtete Marker gefunden, kann das Bild mithilfe der zuvor ermittelten Kamerakalibrierung ebenfalls ausgerichtet und anschließend für eine Augmented Reality-Überlagerung genutzt werden.

5.2.3 Strukturierung

Die einzelnen Teilprozesse sollen nun in eine für die praktische Anwendung sinnvolle zeitliche Reihenfolge gebracht und bezüglich des erforderlichen Fachwissens analysiert werden. Auf dieser Basis können für eine einfache Erlernbarkeit und ein positives Benutzererlebnis kritische Schritte erkannt und beim anschließenden Entwurf der Benutzerführung entsprechend berücksichtigt werden.

Zeitlicher Ablauf

Bei Betrachtung der in den vorigen Abschnitten erarbeiteten Teilprozesse wird klar, dass einige Schritte zur grundsätzlichen Einrichtung des Augmented Reality-Systems, andere nur in Vorbereitung auf, während oder nach einer konkreten Untersuchung durchgeführt werden müssen. Mit der Aufteilung des Schrittes Tracking einrichten in die beiden Unterschritte Tracking konfigurieren und Tracking ausrichten kann der technische Gesamtprozess entsprechend Abbildung 5.11 in eine für den Anwender sinnvolle zeitliche Reihenfolge gebracht werden.

Die Untersuchung wird in die drei Hauptschritte System einrichten, Untersuchung vorbereiten sowie Untersuchung durchführen gegliedert. Die Einrichtung ist bei der Inbetriebnahme eines Systems, nicht jedoch für jede einzelne Untersuchung erforderlich. Sie besteht aus der Kalibrierung der Kamera sowie der Konfiguration des Trackingsystems. In Vorbereitung auf eine konkrete Untersuchung müssen die CAD-Daten geladen und das Tracking ausgerichtet werden. Die Vorbereitung der CAD-Daten sowie die Eingabe der Soll-Koordinaten und die Zuordnung von Markern und Adaptern zur Ausrichtung des Trackings können sowohl für die Online- als auch die Offline-Analyse zeitlich und örtlich vorgelagert zur eigentlichen Untersuchung am physischen Objekt erfolgen. Am physischen Untersuchungsobjekt müssen anschließend die Marker, Adapter und gegebenenfalls Maßstäbe platziert und mit einer Kamera aus verschiedenen Perspektiven aufgenommen werden. Gemeinsam mit der Kamerakalibrierung, der Trackingkonfiguration sowie den vorbereiteten Soll-Koordinaten inklusive der Zuordnung der Marker und Adapter kann die Trackingausrichtung berechnet

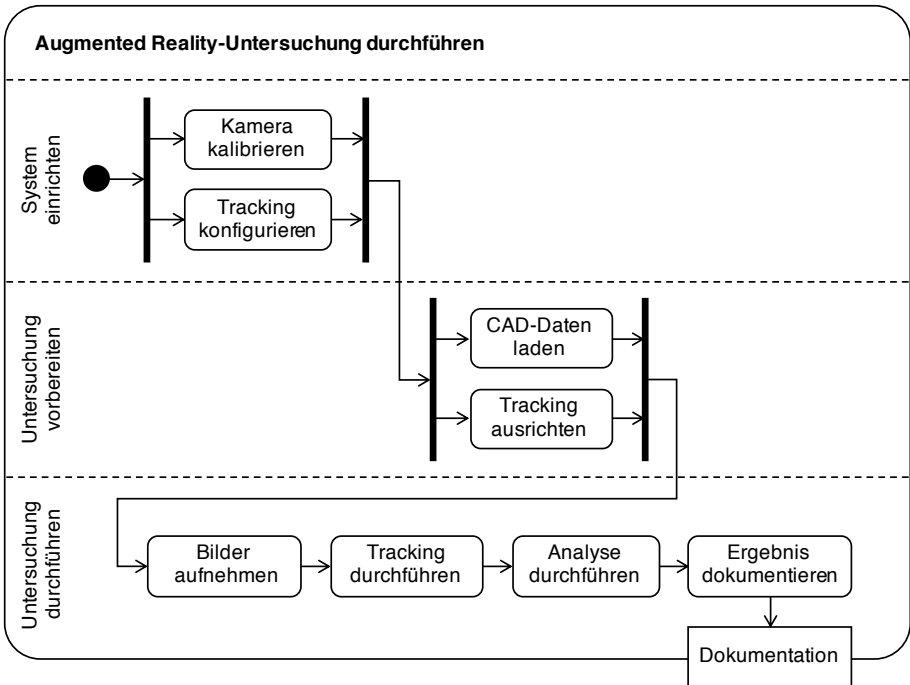


Abbildung 5.11: Strukturierung des Gesamtprozesses

werden. Anschließend wird die eigentliche Untersuchung durchgeführt. Die online oder offline aufgenommenen Bilder oder Videos werden automatisch getrackt. Anhand der überlagerten CAD-Daten können die Analyse durchgeführt und das Ergebnis durch Screenshots oder Videos dokumentiert werden.

Fachwissen

Im Stand der Technik wurde das für Augmented Reality-Untersuchungen erforderliche Fachwissen als ein Hauptgrund für die geringe Verbreitung der Technologie identifiziert. Die einfache Erlernbarkeit stellt daher eine wesentliche Anforderung an das zu entwickelnde Augmented Reality-System dar. Bei Betrachtung des restrukturierten Gesamtprozesses in Abbildung 5.5 wird klar, dass zur Durchführung der drei Hauptschritte System einrichten, Untersuchung vorbereiten und Untersuchung durchführen unterschiedlich viel Fachwissen erforderlich ist.

Für eine Kamerakalibrierung muss neben der Sensorauflösung in Pixeln auch die Größe des Bildsensors der Kamera in x - und y -Richtung bekannt sein. In der Regel können diese den technischen Beschreibungen der Kamerahersteller entnommen werden. Für eine robuste Kamerakalibrierung ist bei der Aufnahme der Kalibrierbilder die Wahl der Aufnahmeperspektiven entscheidend. Die Aufnahmen sollten das Muster aus möglichst unterschiedlichen Blickwinkeln abbilden, wobei die Kameralagen im Idealfall die Oberfläche einer Halbkugel über dem ortsfesten Kalibrierfeld abdecken. Zusätzlich ist zu beachten, dass das gesamte Bildformat über alle Aufnahmen möglichst gleichmäßig mit Markerpunkten abgedeckt wird, damit auch die Verzeichnungsparameter robust abgeschätzt werden können. Die Qualität der Kamerakalibrierung muss schließlich auf Basis des sogenannten Reprojektionsfehlers beurteilt werden [Luh10] [Sch05] [Zha99] [God93]. Das erforderliche Augmented Reality-Fachwissen für die Kamerakalibrierung ist damit als sehr hoch einzustufen [BGK13].

Die Konfiguration des Markertrackings beinhaltet unter anderem die Definition der Kantenlängen der einzelnen Marker sowie des translatorischen und rotatorischen Offsets der geometrischen Adapter. Da die korrekte Angabe des Adapter-Offsets großen Einfluss auf die Überlagerungsgenauigkeit hat, wird dieser im Idealfall mithilfe entsprechender messtechnischer Systeme bestimmt. Zur Vermessung der Adapter kann z. B. das photogrammetrische Messsystem eingesetzt werden. Das für die Konfiguration des Markertrackings erforderliche Fachwissen ist damit als hoch einzustufen.

Die Vorbereitung der CAD-Daten beinhaltet die Datenbeschaffung sowie die Datenauswahl und -konvertierung. Die Datenbeschaffung ist kein Bestandteil des Augmented Reality-Systems. Die Bereitstellung erfolgt entweder per Export aus dem PDM-System oder anhand externer Datenträger, wobei vorausgesetzt wird, dass die Daten im JT-Format vorliegen. Im Augmented Reality-System müssen die bereitgestellten JT-Daten durch den Benutzer vom Dateisystem geladen werden, die anschließende Konvertierung in das vom Renderer benötigte Format erfolgt automatisch. Das hierfür erforderliche Augmented Reality-Fachwissen wird als gering eingestuft.

Anschließend muss das Quadrat- bzw. Kreismarkertracking ausgerichtet werden. In beiden Fällen müssen am physischen Untersuchungsobjekt zunächst die Adapter, Marker und gegebenenfalls Maßstäbe platziert und anschließend mit einer Kamera abgelichtet werden. Wie bei der Kamerakalibrierung ist auch hier auf eine ausreichende Anzahl an Aufnahmen aus möglichst verschiedenen Perspektiven zu achten, damit eine hohe Trackinggenauigkeit gewährleistet werden kann. Innerhalb der Augmented Reality-Anwendung müssen

dann die Soll-Koordinaten der Referenzpunkte eingegeben und den entsprechenden Markern und Adaptern zugeordnet werden. Auf Basis der aufgenommenen Bilder kann dann die Ausrichtung erfolgen. Das hierfür benötigte Augmented Reality-Fachwissen wird auf einem hohen Niveau gesehen.

Für die Untersuchung müssen zunächst die zu analysierenden Bilder aufgenommen und das Tracking durchgeführt werden. Die Aufnahme der Bilder erfolgt durch den Anwender mithilfe einer Online- oder Offline-Kamera, das Tracking wird entweder unmittelbar oder im Falle der Offline-Analyse zeitlich versetzt, jeweils automatisch durch das System durchgeführt. Hierfür wird kein spezielles Augmented Reality-Fachwissen benötigt.

Während der Analyse überlagert der Anwender das ausgerichtete Bild oder Video mit den CAD-Daten und wendet die Untersuchungswerkzeuge an. Das Ergebnis wird durch Screenshots oder Videos dokumentiert. Da die Analyse von CAD-Daten oder physischen Rahmenbedingungen für viele potenzielle Anwender zum Arbeitsalltag gehört, ist immer ein gewisses Grundverständnis für die beiden Anwendungsziele Qualitätsanalyse und Umfeldanalyse sowie die diversen Analyse- und Dokumentationswerkzeuge vorhanden. Das erforderliche spezifische Augmented Reality-Fachwissen wird als eher gering gesehen.

Benutzergruppen

Die Tätigkeiten Kamera kalibrieren, Tracking konfigurieren und Tracking ausrichten benötigen viel spezifisches Augmented Reality-Fachwissen. Ihnen muss daher bei der Modellierung des Benutzerprozesses besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden.

Bei Betrachtung des zeitlich geordneten Gesamtprozesses in Abbildung 5.11 wird klar, dass die Kamerakalibrierung und die Konfiguration des Trackings zwar bei der Ersteinrichtung des Augmented Reality-Systems, nicht jedoch vor jeder Untersuchung durchgeführt werden müssen. Die Problematik des erforderlichen Fachwissens wird dadurch einerseits verschärft, da diese Schritte durch einen normalen Anwender eher selten durchgeführt werden müssen und somit kein ausreichender Übungsgrad erreicht werden kann.

Andererseits ist es dadurch auch möglich, diese beiden Schritte vom eigentlichen Untersuchungsprozess zu entkoppeln und z. B. durch Administratoren durchführen zu lassen. Administratoren übernehmen im IT-Umfeld häufig komplexe Installations-, Konfigurations-, und Wartungsaufgaben z. B. für Arbeitsplatzrechner, Datenbanken oder Serversysteme und werden dafür speziell geschult

[VW08]. Entsprechend Abbildung 5.12 werden die Benutzer daher in die beiden Benutzergruppen Administrator und Anwender unterteilt.

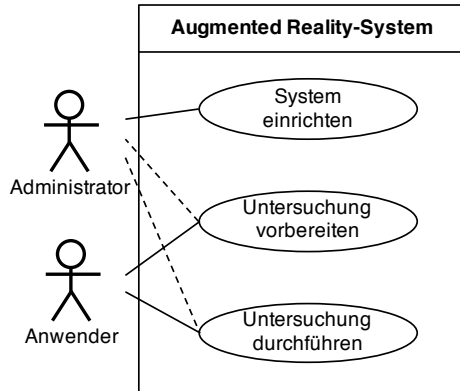


Abbildung 5.12: Anwendungsfalldiagramm mit Benutzergruppen

Der Administrator richtet das System initial ein. Er beschafft und kalibriert die zu verwendenden Kameras und konfiguriert zum Anwendungsfall passende Adaptergeometrien und Markergrößen. Der Anwender kann sich dadurch auf die konkrete Untersuchung konzentrieren, welche vorbereitet und durchgeführt werden muss. Die Aufteilung in die beiden Benutzergruppen Administrator und Anwender reduziert das aus Anwendersicht erforderliche spezifische Augmented Reality-Fachwissen deutlich und wirkt sich somit positiv auf die Erlernbarkeit sowie das Benutzererlebnis aus.

Die Vorbereitung einer Untersuchung erfordert mit der Ausrichtung des Trackingsystems ebenfalls viel Augmented Reality-Fachwissen. Sie muss aber bei jedem Einsatz durchgeführt werden und lässt sich somit nicht auf einen übergeordneten Administrator übertragen. Um dennoch eine schnelle Erlernbarkeit sowie ein positives Benutzererlebnis sicherstellen zu können, muss das System den Anwender bei der Beurteilung der Qualität einer Ausrichtung durch eine geeignete Benutzerführung unterstützen.

5.3 Benutzerführung

Die in den vorigen Abschnitten erarbeiteten Prozessmodelle bilden die Basis für die Ausgestaltung der erforderlichen Nutzerinteraktionen innerhalb der

Augmented Reality-Applikation. Zunächst werden das allgemeine Vorgehen bei der Gestaltungsfindung sowie die eingesetzten Methoden erläutert. Anschließend werden die Anforderungen an die Benutzerführung formuliert und der auf dieser Basis entwickelte finale Lösungsentwurf vorgestellt.

5.3.1 Vorgehen

Bei der Ausgestaltung des Augmented Reality-Systems wurde großer Wert auf ein positives und durchgängiges Benutzererlebnis gelegt. Eine angenehme Designsprache sowie einfache und transparente Arbeitsabläufe sollen den Anwender bei seiner Arbeit unterstützen und die schnelle Erlernbarkeit sowie die intuitive Bedienbarkeit fördern. Für das zu entwickelnde System wurde der Name AURA (kurz für Augmented Reality-App) gewählt. Abbildung 5.13 zeigt einen frühen Entwurf für das AURA-Design [Hub13]. Neben dem Bildlogo und dem Programmsymbol sind noch einige weitere Symbole zur Verwendung innerhalb der Anwendung sowie ein Ideenzettel, auf dem potenzielle Kunden während einer Präsentation zum System ihre Kommentare notieren konnten, abgebildet.



Abbildung 5.13: Früher Designentwurf zu AURA [Hub13]

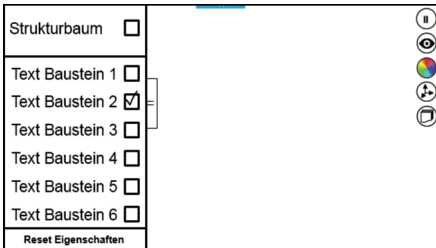
Zur Entwicklung der Benutzerführung wurden zunächst kognitive Durchgänge mit Expertengruppen durchgeführt. Anschließend wurden verschiedene Papier-, Klick- und Funktionsprototypen mit ungeschulten sowie erfahrenen Anwendern evaluiert und iterativ weiterentwickelt. Abbildung 5.14 zeigt beispielhaft einen Papierprototyp inklusive den dafür verwendeten Papiersymbolen, einen frühen Klickprototypen sowie die finale Gestaltungslösung für den Untersuchungsmodus.



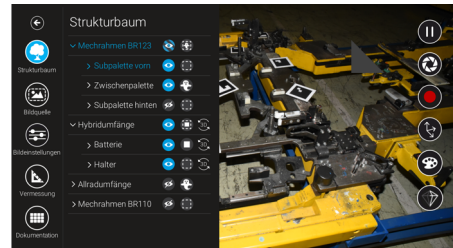
(a) Papiersymbole [Häc14]



(b) Papierprototyp [Häc14]



(c) Klickprototyp



(d) Finale Gestaltungslösung

Abbildung 5.14: Evolution der Benutzerführung

Die Papierprototypen ermöglichten in der frühen Entwurfsphase ein schnelles umordnen einzelner Funktionen und Symbole, um einen ersten groben Eindruck des prinzipiellen Aufbaus der Benutzeroberfläche zu gewinnen. Anschließend wurden die Erkenntnisse in verschiedenen Klickprototypen, welche den Ablauf innerhalb der Applikation dynamisch darstellen, weiterentwickelt. Schließlich wurden die Klickprototypen sukzessive durch entsprechende Funktionsprototypen ergänzt und so die finale Gestaltungslösung erarbeitet. Während dieses iterativen Prozesses haben sich einige wesentliche Anforderungen an die Benutzerführung gezeigt, welche im Folgenden kurz vorgestellt werden sollen.

5.3.2 Anforderungen

Für Aspekte der Benutzerführung, die sich auf die ergonomische Gestaltung des Dialoges zwischen Benutzer und interaktivem System beziehen, bilden die Grundsätze der Dialoggestaltung nach DIN EN ISO 9241-110 einen ersten Anhaltspunkt [DIN08]. Die Norm identifiziert die sieben Grundsätze Aufgabenangemessenheit, Selbstbeschreibungsfähigkeit, Erwartungskonformität, Lernförderlichkeit, Steuerbarkeit, Fehlertoleranz sowie Individualisierbarkeit. Sie bildet damit die Ausgangsbasis für die folgende Definition der Anforderungen an die Benutzerführung.

Ästhetische Aspekte finden in den Grundsätzen der Dialoggestaltung nach DIN EN ISO 9241-110 und auch in den formulierten Anforderungen an die Benutzerführung keine Berücksichtigung, sind aber für das Benutzererlebnis von hoher Bedeutung. Aus diesem Grund wurde für die zu entwickelnde Applikation eine eigene Designrichtlinie entworfen, welche unter anderem die Typografie, das Farbkonzept sowie die verwendeten Symbole beschreibt [Häc14]. Aus Gründen der Kompaktheit wird auf die Darstellung der Details verzichtet.

Aufgabenangemessenheit

Das zu entwickelnde Augmented Reality-System soll für verschiedene Untersuchungen von unterschiedlichen Anwendern eingesetzt werden können. Hierzu ist die Verwaltung einzelner Untersuchungen in Projekten erforderlich. Projekte sollen gespeichert und zu einem späteren Zeitpunkt wieder aufgerufen werden können.

Anforderung Projektverwaltung: Untersuchungen können in Projekten gespeichert und zu einem späteren Zeitpunkt weiterbearbeitet werden.

Während einer Untersuchung soll der Anwender den Tabletcomputer im Querformat mit beiden Händen halten und sich um das Untersuchungsobjekt herum bewegen. Die wichtigsten Funktionen z. B. zur Veränderung der Darstellung der virtuellen Objekte oder zur Aufnahme von Screenshots müssen während der Untersuchung gut auf dem Display des Tabletcomputers erreichbar sein. Bei der Gestaltung der Benutzeroberfläche sind die entsprechenden Greifräume [MIC18] zu beachten.

Anforderung Greifraum: Während einer Untersuchung soll der Tabletcomputer gleichzeitig gehalten und ergonomisch bedient werden können.

Selbstbeschreibungsfähigkeit

Das System soll den Anwender durch den gesamten Prozess von der Auswahl der CAD-Daten und der Ausrichtung des Trackingsystems über die Untersuchung hin zur Dokumentation führen. Dabei soll jederzeit ersichtlich sein, an welcher Stelle im Gesamtprozess sich der Anwender aktuell befindet. Bereits erledigte Prozessschritte sollen entsprechend gekennzeichnet werden.

Anforderung Prozess: Das System führt durch den gesamten Prozess und zeigt nach Möglichkeit an, welche Teilaufgaben bereits abgeschlossen wurden und welche Aufgabe aktuell bearbeitet wird.

Erwartungskonformität

Das System soll sowohl online in einem Live-Modus, bei welchem sich der Anwender mit dem Tabletcomputer um das Untersuchungsobjekt bewegt und die Überlagerung in Echtzeit betrachtet, als auch in einem Offline-Modus mit Fotos oder Videos, die erst nach der Aufnahme zeitlich und ggf. örtlich getrennt ausgerichtet und überlagert werden, zum Einsatz kommen. Um die Lernförderlichkeit und die Erwartungskonformität zu unterstützen, sollen beide Modi eine möglichst identische Benutzerführung aufweisen.

Anforderung Konformität: Die Benutzerführung soll für die Online- und die Offline-Analyse möglichst identisch sein.

Besonders während der Einrichtung des Systems können z. B. zur Ausrichtung des Trackingsystems oder zur Konvertierung von CAD-Daten komplexere Berechnungen notwendig sein, die einige Zeit beanspruchen. Damit der Anwender weiß, dass das System im Hintergrund arbeitet und nicht etwa abgestürzt ist, soll eine Anzeige über den jeweiligen Arbeitsfortschritt informieren.

Anforderung Systemantwort: Dauert eine Systemantwort länger als erwartet, informiert das System entweder über den Arbeitsfortschritt oder zeigt z. B. durch eine Animation an, dass es noch arbeitet.

Viele Anwender verwenden privat oder auf der Arbeit Smartphones und Tabletcomputer und sind bereits an die gängigen Interaktionsmetaphern wie z. B. das Auseinander- oder Zusammenziehen von zwei Fingern zum Heraus- oder Hineinzoomen gewöhnt. Im Sinne der Erwartungskonformität soll die Applikation diese bekannten Metaphern [MIC18] aufgreifen.

Anforderung Metaphern: Nach Möglichkeit sollen die für Tablet- und Smartphoneanwendungen üblichen Interaktionsmetaphern verwendet werden.

Lernförderlichkeit

Um das für die Anwendung notwendige Fachwissen möglichst gering zu halten, wurde in Abschnitt 5.2.3 eine Unterteilung in die beiden Benutzergruppen Administrator und Anwender vorgenommen. Der Administrator ist für die initiale Einrichtung des Systems, also die Kamerakalibrierung und die Trackingkonfiguration, zuständig. Der Anwender kann sich dadurch vollständig auf die für eine konkrete Untersuchung erforderlichen Tätigkeiten konzentrieren. Die beiden Benutzergruppen müssen sich auch in der grafischen Benutzerführung widerspiegeln.

Anforderung Benutzergruppen: Die Kamerakalibrierung und die Konfiguration des Trackingsystems sind vom eigentlichen Untersuchungsprozess entkoppelt, die entsprechenden Einstellungen können aber einfach für Untersuchungen genutzt werden.

Steuerbarkeit

Steuerbarkeit bedeutet, dass der Anwender die Richtung und die Geschwindigkeit des Dialogverlaufs selbstständig beeinflussen kann. Auch bezüglich der Fehlertoleranz ist es wichtig, dass es für den Anwender jederzeit möglich ist, im Prozess zurückzugehen und vorige Schritte erneut durchführen und damit korrigieren zu können.

Anforderung Schritt zurück: Es ist jederzeit möglich, im Prozess zurückzugehen und vorige Schritte erneut durchzuführen.

Häufig kann eine Augmented Reality-Untersuchung schon vor der eigentlichen Analyse am Untersuchungsobjekt vorbereitet werden. Die zu verwendenden CAD-Daten oder die benötigten Einmesspunkte sind in der Regel bereits bekannt, bevor der Anwender das physische Untersuchungsobjekt örtlich aufsucht. Damit die Zeit vor Ort möglichst effizient genutzt werden kann, soll die Benutzerführung die Vorbereitung der entsprechenden Daten ermöglichen.

Anforderung Vorbereitung: Die für eine Untersuchung benötigten CAD-Daten und Einmesspunkte sollen im Vorfeld definiert werden können.

Fehlertoleranz

Die potenziellen Anwender sind keine Experten im Bereich Augmented Reality und können mögliche Fehler daher in der Regel nur schwer abschätzen. Tritt ein Fehler im Prozess auf, soll die Anwendung den Anwender darauf aufmerksam

machen und beim Eingrenzen sowie Beheben der Fehlerursache helfen. Dies gilt insbesondere für die Einrichtung des Trackingsystems, da dieser Schritt viel spezifisches Augmented Reality-Fachwissen voraussetzt (vgl. Abschnitt 5.2.3).

Anforderung Fehlerrückmeldung: Tritt ein Fehler auf, soll die Anwendung eine geeignete Rückmeldung geben und auf die Fehlerursache aufmerksam machen.

Individualisierbarkeit

Individualisierbarkeit bedeutet, dass der Anwender die Darstellung von Informationen an seine speziellen Bedürfnisse anpassen kann. Auf Individualisierungsmöglichkeiten der Applikation wird jedoch vorerst verzichtet, da zunächst Rückmeldungen aus dem Praxiseinsatz eingeholt werden sollen. Auf dieser Basis können die zielführenden Individualisierungsmöglichkeiten identifiziert und in einer späteren Version der Software umgesetzt werden.

5.3.3 Finale Gestaltungslösung

Die im vorigen Abschnitt erarbeiteten Anforderungen bildeten gemeinsam mit den Prozessmodellen aus Abschnitt 5.2 sowie einer eigens erstellten Designrichtlinie [Häc14] die Basis für die Ausgestaltung der Benutzerführung nach dem in Abschnitt 5.3.1 geschilderten Vorgehen. Die in diesem iterativen Prozess erarbeitete finale Gestaltungslösung wird im Folgenden vorgestellt. Zur einfacheren Beschreibung der Benutzerführung sind die wichtigsten Elemente in den Abbildungen durchnummeriert und werden entsprechend im Text referenziert.

Projektverwaltung

Den Einstieg in die Augmented Reality-Applikation bildet die in Abbildung 5.15 dargestellte Projektverwaltung. In der oberen Leiste (1) wird angezeigt, in welchem Schritt sich der Anwender aktuell befindet, darunter (2) wird ein kurzer Hinweis auf mögliche Aktionen gegeben (vgl. *Anforderung Prozess*). Dieses Schema wird auch für die folgenden Dialoge beibehalten. Alle wichtigen Parameter einer konkreten Untersuchung, etwa die verwendeten CAD-Daten, die Trackingkonfiguration oder die Dokumentationsergebnisse, werden in Projekten gespeichert (vgl. *Anforderung Projektverwaltung*). Über das Plus-Symbol links unten (3) lässt sich ein neues Projekt anlegen. Alternativ kann ein existierendes Projekt geöffnet werden (4), dann wird zunächst ein Übersichtsfenster der Projektdetails angezeigt. Hier kann der Anwender das Projekt umbenennen



Abbildung 5.15: Dialog Projektverwaltung

oder löschen und den Projektstatus prüfen, z. B. welche CAD-Objekte gewählt, welches Tracking verwendet und ob bereits eine Dokumentation erstellt wurde (vgl. *Anforderung Prozess*). Projekte speichern sich während der Arbeit zu bestimmten Zeitpunkten in versionierter Form automatisch ab. Auf diese Weise gehen keine Änderungen unabsichtlich verloren, gleichzeitig kann einfach auf frühere Projektstände zurückgegriffen werden. Über das Hamburgermenü-Symbol in der rechten oberen Ecke der Projektverwaltung (5) kann ein Administrator die für alle Projekte übergeordneten Einstellungen erreichen (vgl. *Anforderung Benutzergruppen*). Neben der Konfiguration des Trackingsystems, also z. B. der Marker (Kantenlängen und Marker-IDs) oder der Adapter (translatorischer und rotatorischer Offset, festgelegte Freiheitsgrade), können hier auch die im System verwendeten Video- und Fotokameras verwaltet und kalibriert werden. Auf diese Weise können Administratoren individuelle Augmented Reality-Systeme zusammenstellen und konfigurieren. Die übergeordneten Einstellungen werden für jedes neu angelegte Projekt übernommen.

Projektübersicht

Wurde ein existierendes Projekt ausgewählt oder ein neues Projekt angelegt, öffnet sich die in Abbildung 5.16 dargestellte Projektübersicht. Die obere Zeile zeigt den Titel des aktuellen Projektes (1). Über den Pfeil in der linken oberen

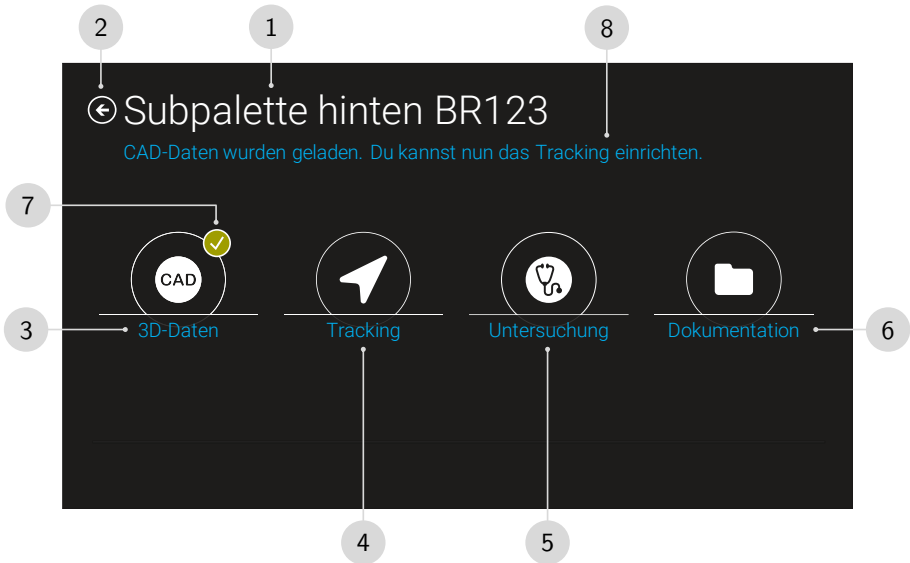


Abbildung 5.16: Dialog Projektübersicht

Ecke (2) kann wieder zurück in die Projektverwaltung gewechselt und ein anderes Projekt ausgewählt oder angelegt werden. Die Möglichkeit durch einen Pfeil links oben einen Schritt zurückzugehen findet sich auch in allen folgenden Prozessschritten (vgl. *Anforderung Schritt zurück*). In der Projektübersicht sind die Hauptschritte einer Augmented Reality-Untersuchung einzeln erreichbar. Die Anordnung entspricht dem Aktivitätsdiagramm des Gesamtprozesses in Abbildung 5.5, wobei die initiale Systemeinrichtung bereits übergeordnet durch einen Administrator erfolgt ist. Unter dem Menüpunkt 3D-Daten (3) werden die zu visualisierenden virtuellen Daten ausgewählt und konvertiert. Unter dem Menüpunkt Tracking (4) wird das Trackingsystem auf das Untersuchungsobjekt ausgerichtet. Der Menüpunkt Untersuchung (5) vereint die drei Schritte Bilder aufnehmen, Bilder ausrichten und Analyse durchführen, da sie prozessual sehr eng zusammenhängen und für den Anwender eine Einheit bilden müssen. Aus den während einer Untersuchung aufgenommenen Screenshots kann unter dem Menüpunkt Dokumentation (6) ein Ergebnisprotokoll erstellt werden. Eine Untersuchung kann erst durchgeführt werden, wenn die CAD-Daten geladen und das Tracking ausgerichtet wurden. Daher sind die beiden Hauptschritte Untersuchung und Dokumentation solange ausgegraut, bis die beiden vorigen Schritte abgeschlossen wurden. Ein abgeschlossener Hauptschritt wird durch

ein klar erkennbares grünes Häkchen (7) am jeweiligen Symbol gekennzeichnet (vgl. *Anforderung Prozess*). In der Beispielabbildung wurde die Auswahl der CAD-Daten bereits durchgeführt. Das System fordert den Anwender auf, als nächstes das Tracking einzurichten (8).

CAD-Daten laden

Durch Auswahl des 3D-Daten-Symbols in der Projektübersicht öffnet sich der in Abbildung 5.17 dargestellte Dialog zum Laden der CAD-Daten. Zur Vorbereitung einer Untersuchung kann die Auswahl der zu verwendenden CAD-Daten losgelöst von den übrigen Hauptschritten durchgeführt werden (vgl. *Anforderung Vorbereitung*). Entsprechend dem Prozessmodell in Abbildung 5.7 müssen die für die Untersuchung zu verwendenden CAD-Daten lediglich ausgewählt werden, die Konvertierung in das vom Renderer benötigte Zielformat erfolgt automatisch. Auf der linken Seite werden die in der aktuellen Untersuchung verwendeten CAD-Daten angezeigt (1). Rechts finden sich die aus dem PDM-System (2) und darunter die aus externen Quellen (3) importierten CAD-Daten. Aus dem PDM-System für Augmented Reality-Untersuchungen exportierte Daten werden immer in einem definierten Standardordner abgelegt. Sie können dadurch ohne zusätzlichen Importaufwand direkt in der Liste mit den PDM-Daten angezeigt werden. Durch das Plus-Symbol am unteren Rand (4) lassen sich Dateien von externen Datenträgern einlesen. Sie werden anschließend in der Liste mit den extern importierten Daten angezeigt. Die zu untersuchenden CAD-Datensätze



Abbildung 5.17: Dialog CAD-Daten laden

lassen sich entweder über das Pfeil-Symbol (5) oder durch Schieben mit dem Finger in die aktuelle Untersuchung übernehmen (vgl. *Anforderung Metaphern*). Sie werden durch diesen Schritt automatisch in das vom Renderer benötigte Datenformat konvertiert. Ein Entfernen von CAD-Datensätzen aus der aktuellen Untersuchung ist über das Kreuz-Symbol neben dem jeweiligen Dateinamen möglich (6). Sind alle benötigten 3D-Daten in die Untersuchung übernommen worden, führt das Pfeil-Symbol rechts unten (7) wieder in die Projektübersicht.

Tracking ausrichten

In diesem Beispiel wird das Quadratmarkertracking ausgerichtet. Entsprechend dem Prozessmodell in Abbildung 5.9 sind dafür zunächst die Marker und Adapter auf dem physischen Untersuchungsobjekt zu platzieren. In der Augmented Reality-Applikation müssen die Soll-Koordinaten der Referenzpunkte eingegeben und den verwendeten Adaptern sowie Markern zugeordnet werden. Anschließend kann gemeinsam mit den aufgenommenen Bildern des Markerverbunds die Ausrichtung berechnet werden. Der Prozess zur Ausrichtung des Trackings wird in der Applikation in die beiden Teilschritte Ausrichtung vorbereiten sowie Ausrichtung durchführen gegliedert.

Bei der Vorbereitung der Ausrichtung werden die Soll-Koordinaten eingegeben und den Adaptern sowie Markern zugeordnet. Dieser Schritt kann sowohl zeitlich als auch örtlich vor der eigentlichen Analyse am Untersuchungsobjekt erfolgen (vgl. *Anforderung Vorbereitung*). Abbildung 5.18 zeigt den zugehörigen Dialog. Jede Zeile in der Darstellung entspricht einem Referenzpunkt inklusive Adapter und Marker. Über das Plus-Symbol unten links (1) lassen sich beliebig viele neue Referenzpunkte hinzufügen, welche in der Übersicht fortlaufend nummeriert werden. Über das Kreuz-Symbol (2) können einzelne Messpunkte wieder entfernt werden. Wurde ein neuer Punkt angelegt, kann mithilfe des Adapter-Symbols (3) der verwendete Adapter über ein Pop-Up-Menü ausgewählt werden. Durch die Nutzung verschiedener Adapter ist es möglich, die Ausrichtung z. B. über Bohrungen, Flächen, Kanten oder sonstige Punkte durchzuführen. Der für den Messpunkt bzw. Adapter verwendete Marker wird über das Markersymbol (4) ebenfalls über ein Pop-Up-Menü ausgewählt. Durch das modulare Konzept können Marker verschiedener Größe theoretisch frei mit Adaptern unterschiedlicher Geometrie kombiniert werden (vgl. Abbildung 5.2), sodass die Ausrichtung auf unterschiedlichste Untersuchungsobjekte flexibel möglich ist. Die Adapter und Marker sind sowohl in Hardware als auch in der Applikation durchnummeriert. Die gewählte Nummer wird neben den entsprechenden Adapter- und Markersymbolen im Menü angezeigt, was eine schnelle Kontrolle der Auswahl

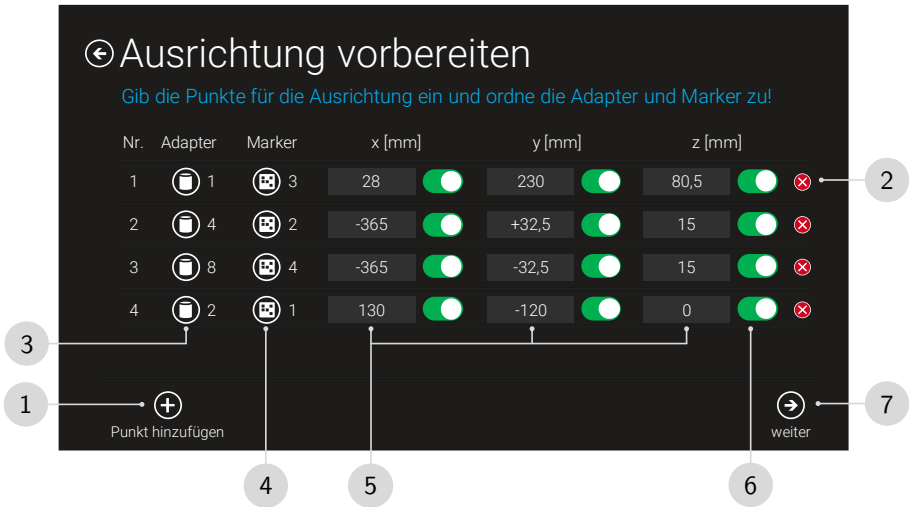


Abbildung 5.18: Dialog Ausrichtung vorbereiten

sowie bei vorbereiteten Projekten eine sichere Zuordnung ermöglicht (vgl. *Anforderung Vorbereitung*). Über die drei Felder auf der rechten Seite (5) werden die x -, y - und z -Koordinaten eingegeben. Durch die Auswahlssymbole neben den jeweiligen Koordinaten (6) können diese einzeln aktiviert oder deaktiviert werden. So kann z. B. durch Deaktivierung der x - und y -Koordinaten ein Marker ohne Adapter lediglich zur Definition einer z -Koordinate, etwa auf einer Fläche liegend, genutzt werden. Durch Deaktivierung einzelner Freiheitsgrade fallen allerdings auch für die Ausrichtung benötigte Beobachtungsgleichungen weg, was durch das Hinzufügen weiterer Punkte kompensiert werden muss. Der Weiter-Pfeil (7) auf der rechten unteren Seite ist zur Unterstützung so lange grau markiert und kann nicht ausgewählt werden, bis ausreichend Punkte mit genügend definierten Freiheitsgraden vorhanden sind. Wird er vorher betätigt erscheint eine Hinweismeldung, welche über die zusätzlich benötigte Anzahl an Referenzpunkten informiert und auf eventuell deaktivierte Freiheitsgrade hinweist (vgl. *Anforderung Fehlerrückmeldung*).

Theoretisch könnte für die Festlegung der Freiheitsgrade eines Markers nicht nur seine Position, sondern auch seine Orientierung herangezogen werden. Dann müssten zusätzlich zu den x -, y - und z -Koordinaten auch die Drehwinkel um diese drei Raumachsen angegeben werden. Probandenversuche haben allerdings gezeigt, dass die Ausrichtung für die Anwender dadurch deutlich schwieriger

zu verstehen ist. Im Sinne der einfachen Erlernbarkeit sowie eines positiven Benutzerolebnisses wird daher in dieser Version der Anwendung auf die mögliche Festlegung rotatorischer Freiheitsgrade verzichtet.

Im nächsten Schritt muss die Ausrichtung durchgeführt werden. Abbildung 5.19 zeigt den entsprechenden Dialog in der Applikation. Über das Plus-Symbol auf der linken unteren Seite (1) lassen sich z. B. mit einer kalibrierten Spiegelreflexkamera aufgenommene Bilder für die Ausrichtung hinzufügen. Alternativ kann über das Kamerasymbol daneben (2) die Aufnahme von Ausrichtungsbildern z. B. mithilfe der Videokamera des Tabletcomputers oder einer anderen kalibrierten Live-Kamera durchgeführt werden (vgl. *Anforderung Konformität*). Die geladenen oder aufgenommenen Bilder werden anschließend in der Bildergalerie dargestellt. Über das Kreuz-Symbol (3) können sie wieder entfernt werden. Durch Betätigung des Pfeil-Symbols rechts unten (4) werden die Bilder analysiert und nach Markern durchsucht. Weil die Berechnung der Ausrichtung einige Sekunden dauert, wird dabei ein prozentualer Fortschrittsbalken angezeigt (vgl. *Anforderung Systemantwort*). Das Markertracking kann nur dann erfolgreich ausgerichtet werden, wenn auf den aufgenommenen Bildern eine ausreichende Anzahl an Markern gefunden wird. Dieser kritische Schritt erfordert viel Fachwissen und ist durch die Benutzerführung zu unterstützen. Daher wird als Qualitätsmerkmal definiert, dass ein Marker nur dann als ausge-

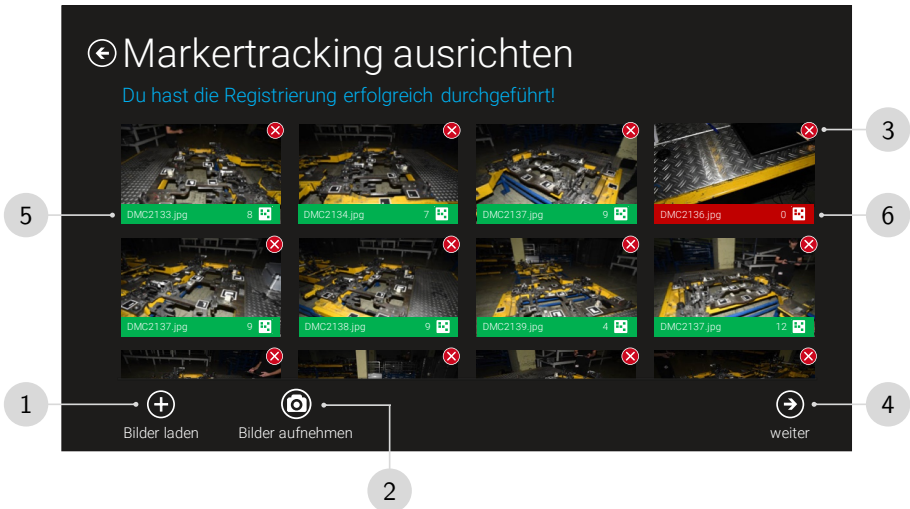


Abbildung 5.19: Dialog Ausrichtung durchführen

richtet gilt, wenn er auf mindestens fünf Bildern getrackt werden konnte und der bei der Lageabschätzung entstehende Projektionsfehler unter einem gewissen Schwellwert liegt. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass genügend korrekte Beobachtungen für eine robuste Ausrichtung vorhanden sind. Im dargestellten Beispiel hat die Ausrichtung bereits erfolgreich stattgefunden. Wenn die Ausrichtung eines Bildes erfolgreich war, wird es grün markiert (5), zusätzlich wird in der eingefärbten Statusleiste die Anzahl der erkannten Marker dargestellt. Rot markierte Bilder (6) zeigen dem Anwender dagegen an, dass darauf keine Marker gefunden und ausgerichtet werden konnten. Konnte kein Marker über die Bilder ausgerichtet werden, erscheint in einem Pop-Up-Dialog ein Fehlerhinweis mit der Aufforderung, weitere Bilder mit gut sichtbaren Markern aufzunehmen oder die Einmesskoordinaten zu überprüfen (vgl. *Anforderung Fehlerrückmeldung*). In diesem Fall kann die Hinzunahme weiterer Bilder oder die Kontrolle der Koordinaten schnell über das bekannte Schritt-Zurück-Pfeilsymbol im linken oberen Rand erreicht und die Ausrichtung anschließend erneut angestoßen werden (vgl. *Anforderung Schritt zurück*).

Untersuchung

Nachdem die CAD-Daten geladen und das Trackingsystem erfolgreich ausgerichtet wurden, wird in der Projektübersicht das Symbol für die Untersuchung ausgewählt. Der in Abbildung 5.20 dargestellte Untersuchungsmodus öffnet sich. Alle Symbole zur Interaktion sind entweder am linken oder am rechten Bildschirmrand angebracht. Auch wenn der Tabletcomputer während einer Untersuchung mit beiden Händen gehalten wird, können die Symbole dadurch mit dem linken bzw. rechten Daumen noch gut erreicht werden (vgl. *Anforderung Greifraum*). Wird eine Offline-Analyse auf Bildern durchgeführt, lässt sich der betrachtete Bildausschnitt durch bekannte Fingergesten [MIC18] manipulieren (vgl. *Anforderung Metaphern*). Die Funktionen am linken und am rechten Rand sind thematisch sortiert. Links befinden sich eher grundsätzliche Funktionen, die vor- oder nachbereitend zur eigentlichen Analyse der Überlagerung durchgeführt werden: Der Wechsel zurück in die Projektübersicht (1), das Arbeiten im Strukturbaum (2), die Auswahl der Bildquelle (3), die Bildeinstellungen (4), die Vermessungsfunktionen (5) sowie die Dokumentationsgalerie (6). Außer dem Zurück-Pfeil benötigen die Dialoge auf der linken Seite tendenziell viel Platz, werden dafür aber seltener aufgerufen. Die Symbole liegen auf einem dunklen Hintergrund verankert und sind beschriftet ausgeführt. Bei Betätigung schieben sich die zugehörigen Dialoge von links aufgehend bis auf die halbe Fensterbreite ins Bild. So kann in den Menüs gearbeitet und gleichzeitig die Überlagerung betrachtet werden. Rechts finden sich eher die Funktionen, welche



Abbildung 5.20: Dialog Untersuchungsmodus

unmittelbar mit der Analyse der betrachteten Überlagerung zusammenhängen: Die (nur im Live-Modus verfügbare) Pause-Funktion (7), die Aufnahme von Screenshots (8) und Videos (9), die Objekttransformation inklusive Translation, Rotation und Skalierung (10) sowie die Steuerung von Farbe (11) und Transparenz (12) der virtuellen Objekte. Die zugehörigen Symbole sind ohne zusätzlichen Hintergrund auf der Überlagerung schwebend dargestellt, um den direkteren Bezug zum visualisierten Bild zu verdeutlichen. Die Aufteilung der Funktionen in die optisch eher schwere linke Seite mit aufklappenden Submenüs und die optisch eher leichte rechte Seite mit den Werkzeugen zur Analyse und Beurteilung soll die intuitive Bedienbarkeit sowie ein positives Benutzererlebnis unterstützen.

Strukturbaum und Translation

Abbildung 5.21 zeigt das Menü für den Strukturbaum, welches die hierarchische Struktur der geladenen CAD-Dateien abbildet. Durch das blau eingefärbte Strukturbaumsymbol (1) ist ersichtlich, dass dieses Menü aktuell geöffnet ist. Ein Pfeil vor dem Namen eines CAD-Elementes (2) zeigt an, dass zusätzliche Unterelemente existieren. Durch Betätigung des Pfeils kann die Unterstruktur auf- und zugeklappt werden. Über das Auge-Symbol neben seinem Dateinamen (3) kann ein Element inklusive seiner Unterelemente ein- oder ausgeblendet

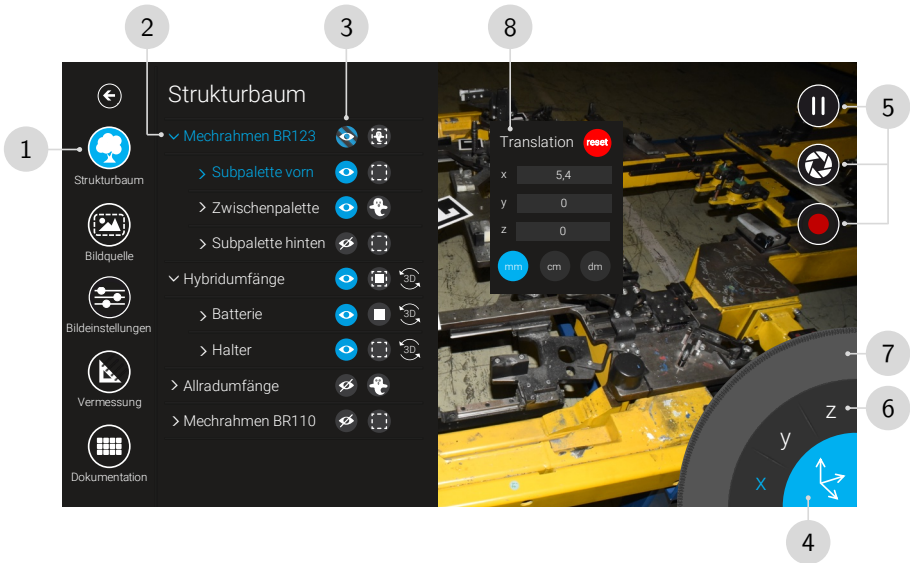


Abbildung 5.21: Dialog Strukturbaum und Translation

werden, über das Symbol rechts daneben lässt sich zwischen den Darstellungsformen Vollgeometrie-, Drahtgitter- und Verdeckungsdarstellung wechseln. Das Symbol verändert sich je nach gewählter Darstellungsform zwischen einem ausgefüllten Quadrat für die Vollgeometriedarstellung, einem gestrichelten Quadrat für die Drahtgitter- und einem Geist für die Verdeckungsdarstellung. Die Symbole können auch kombiniert auftreten, falls für Unterelemente verschiedene Darstellungsformen gewählt sind. Durch kurzes Antippen des Namens im Strukturbaum können CAD-Objekte inklusive ihrer Unterelemente ausgewählt werden. Die Elemente werden dann im Strukturbaum blau markiert und können gemeinsam transformiert, eingefärbt oder transparent dargestellt werden. Im gezeigten Beispiel wurde bereits das Werkzeug zur Translation ausgewählt, wodurch auf der rechten unteren Seite ein entsprechender Einstellregler (4) erscheint. Die Symbole zum Aufrufen des Pause-Modus sowie zur Anfertigung von Screenshots und Videos (5) bleiben dabei direkt erreichbar. Über die x -, y - und z -Koordinaten (6) wird die Achsrichtung der Translation festgelegt, der umgebende hellere Viertelkreis (7) ist ein virtueller Drehregler mit Drehpunkt in der rechten unteren Ecke des Bildschirms und steuert den Wert der translatorischen Verschiebung. Der Drehregler ist so gestaltet, dass er auch dann gut bedient werden kann, wenn der Tabletcomputer wäh-

rend einer Untersuchung beidhändig gehalten wird (vgl. *Anforderung Greifräume*). Er wird mit dem rechten Daumen bedient. Die Schrittweite kann in einem zusätzlichen Detailfenster (8) zwischen Millimetern, Zentimetern und Dezimetern gewechselt werden. Das frei verschiebbare Detailfenster zeigt außerdem, um welchen Wert die gewählten CAD-Objekte entlang der drei Koordinatenrichtungen verschoben wurden. Durch Tippen auf die x -, y - oder z -Werte im Detailfenster lassen sich die Werte auch direkt eingeben. Dieselbe Bedienmethodik wie für die Translation wird auch für die Rotation sowie die Skalierung verfolgt. Der Grad der Transparenz eines virtuellen Objektes wird ähnlich der Translation ebenfalls anhand eines Drehreglers eingestellt, für die Einfärbung wird ein eigenes Detailfenster mit ausgewählten Farben angezeigt.

Bildquelle

Entsprechend Abbildung 5.22 kann unter dem Menüpunkt Bildquelle (1) einfach zwischen Live-Kameras, aufgenommenen Bildern und Videos gewechselt werden. Die Entscheidung für eine Online- oder Offline-Analyse wird somit einzig durch die Auswahl der verwendeten Bildquelle getroffen (vgl. *Anforderung Konformität*). Im dargestellten Beispiel wurde in den übergeordneten Einstellungen die Tabletkamera für Live-Untersuchungen konfigu-

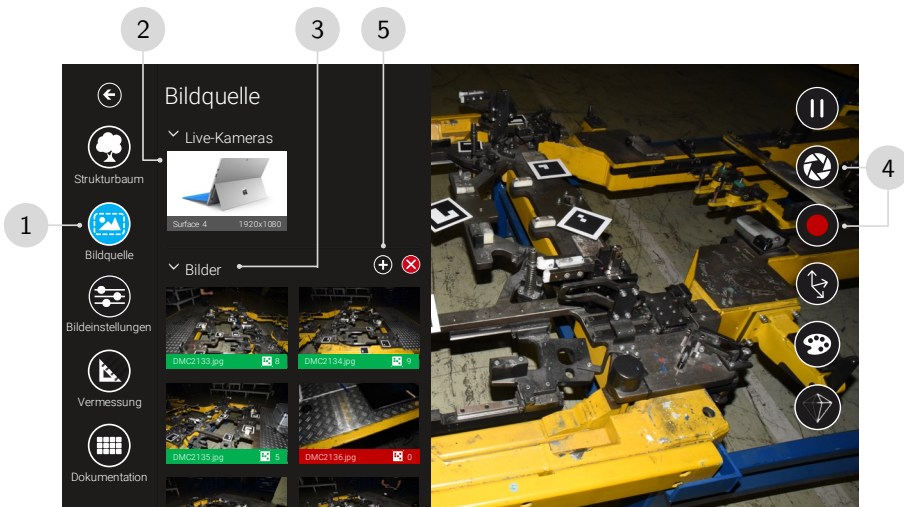


Abbildung 5.22: Dialog Bildquelle

riert und kann für die Untersuchung verwendet werden. Sie lässt sich über das Tabletsymbol (2) aktivieren, die zugehörige Kamerakalibrierung wird dadurch automatisch geladen (vgl. *Anforderung Benutzergruppen*). Die Galerie darunter (3) zeigt alle aufgenommenen Bilder und Videos an. Dies betrifft sowohl über die Screenshot- oder die Videofunktion (4) aufgenommene als auch von externen Quellen eingespielte Bilder und Videos. Anhand der grünen oder roten Einfärbung der Bilder in der Galerie kann wie schon bei der Ausrichtung des Trackingsystems direkt gesehen werden, ob das Tracking auf diesem Bild erfolgreich war und wieviele Marker darauf gefunden wurden (vgl. *Anforderung Fehlerrückmeldung*). Die Ausrichtung ist im Regelfall umso genauer, je mehr Marker in einem Bild erkannt und getrackt werden können. Wurde ein Bild geöffnet, kann der Bildausschnitt wie auf Tabletcomputern und Smartphones üblich durch Auseinander- oder Zusammenziehen von zwei Fingern verkleinert oder vergrößert sowie durch Schieben mit einem Finger verschoben werden (vgl. *Anforderung Metaphern*). Über das Plus-Symbol (5) lassen sich weitere Bilder oder Videos von externen Quellen hinzufügen, über das rote Kreuz-Symbol daneben können sie wieder entfernt werden.

Ergebnis dokumentieren

Die Screenshotfunktion kann auf Fotos, Videos aus dem Live-Stream oder aus dem Pause-Modus heraus genutzt werden. Nach Betätigung des Screenshot-Symbols öffnet sich der in Abbildung 5.23 dargestellte Dialog. Links oben befindet sich ein Kreuz-Symbol (1) zum Abbruch des Screenshots, dann wird wieder in den Untersuchungsmodus gewechselt. Über die Symbole darunter lassen sich verschiedene Bearbeitungsfunktionen aufrufen. Neben einem Freihandpinsel (2) können auch Formen wie z. B. Quadrate oder Kreise (3) zur Hervorhebung von interessanten Bildbereichen sowie Text (4) zur näheren Problembeschreibung verwendet werden. Die jeweilige Farbe, Linienstärke und sonstige Einstellungen werden nach Aufruf der jeweiligen Editierfunktion bedarfsgerecht eingeblendet. Über das Pfeil-Symbol rechts oben (5) können die Bearbeitungsschritte rückgängig gemacht werden (vgl. *Anforderung Schritt zurück*). Darunter ist das Symbol zum Speichern des Screenshots (6) positioniert. Das Speichern-Symbol wurde bewusst auf dieselbe Position gelegt, auf der sich auch das Screenshot-Symbol im Untersuchungsmodus befindet. Falls keine Bearbeitung, sondern nur die schnelle Speicherung eines Screenshots gewünscht ist, kann dies durch zweimaliges Tippen derselben Position schnell und einfach durchgeführt werden. Nach Abspeichern des Screenshots wird direkt wieder der Untersuchungsmodus aufgerufen. Die Screenshots können dann

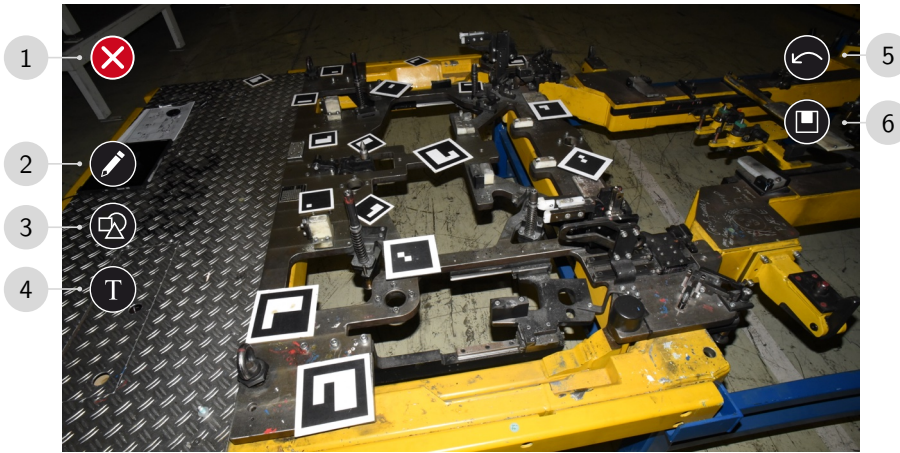


Abbildung 5.23: Dialog Bearbeiten von Screenshots

über das Symbol für die Dokumentationsgalerie links unten erneut aufgerufen werden. Die Dokumentationsgalerie ist bis auf die fehlende Kameraauswahl weitestgehend identisch zum Submenü Bildquelle aus Abbildung 5.22 aufgebaut. Eine nicht mit virtuellen Daten, Hinweisen und Annotationen überlagerte jedoch getrackte Kopie des Screenshots wird unter dem Punkt Bildquelle in der Bildergalerie abgelegt. Auf diese Weise können nachgelagert weitere Analysen aus der aufgenommenen Perspektive z. B. mit verändert dargestellten oder überarbeiteten CAD-Datensätzen erfolgen (vgl. *Anforderung Schritt zurück*).

Im Anschluss an die Untersuchung kann ein Versuchsprotokoll aller relevanten Screenshots erstellt und exportiert werden. Hierfür wird in der Projektübersicht das Symbol für die Dokumentation ausgewählt. Der Dialog zur Dokumentation gestaltet sich entsprechend Abbildung 5.24. Links ist eine Übersicht der einzelnen Protokollseiten dargestellt (1), mittig die Detailansicht des Protokolls (2) und rechts die zur Verfügung stehenden Screenshots aus der Untersuchung (3). Die Screenshots können mit dem Finger von der rechten Seite in die Detailansicht in der Mitte gezogen werden, zusätzlich lassen sich unterhalb der Bilder Beschreibungstexte zur näheren Erläuterung der Screenshots hinzufügen. Falls Änderungen z. B. an Markierungen oder Annotationen erforderlich sind, kann durch Tippen auf einen Screenshot der Dialog zur Bearbeitung von Screenshots aus Abbildung 5.23 aufgerufen werden. Ist eine weitere Analyse der CAD-Daten notwendig, kann der

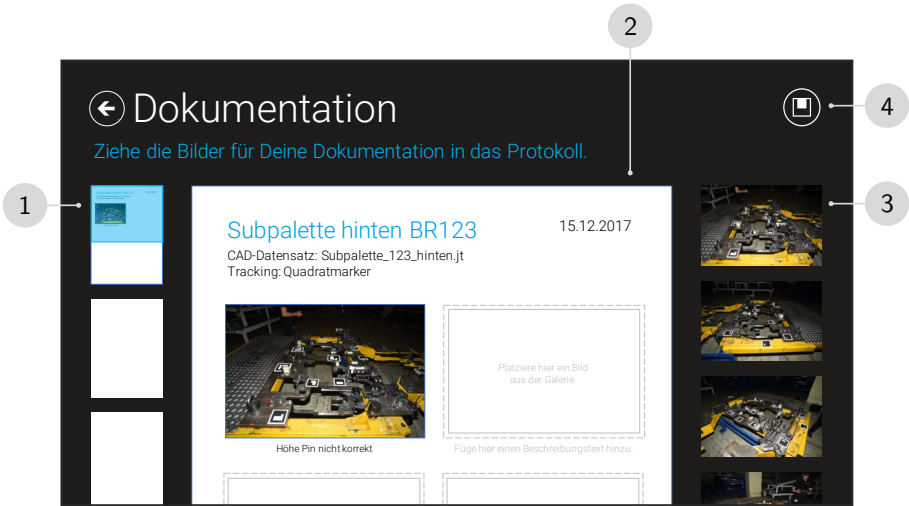


Abbildung 5.24: Dialog Untersuchungsprotokoll

entsprechende Screenshot durch Berühren und Halten im Untersuchungsmodus entsprechend Abbildung 5.20 geöffnet werden (vgl. *Anforderung Schritt zurück*). Wurden alle Erkenntnisse im Untersuchungsprotokoll dokumentiert, kann es über das Speichern-Symbol (4) im pdf-Format auf einen Datenträger exportiert werden. Die Augmented Reality-Untersuchung ist damit abgeschlossen.

5.4 Zusammenfassung

Als Basis für das zu entwickelnde Augmented Reality-System wurden ein Tabletcomputer und ein optisches Markertracking ausgewählt. Für die Kamera-Kalibrierung werden Methoden und Komponenten eines photogrammetrischen Messsystems eingesetzt. Für das Tracking werden ein photogrammetrisches Kreismarkertracking sowie ein Quadratmarkertracking umgesetzt. Die Ausrichtung wird in beiden Fällen anhand von Markern und Adaptern durchgeführt. Die beiden Tracker können miteinander kombiniert werden, um die Nachteile der fehlenden Echtzeitfähigkeit des Kreismarkertrackings bzw. der fehlenden Genauigkeit des Quadratmarkertrackings auszugleichen. Im Live-Modus wird das Tracking in Echtzeit über die Quadratmarker durchgeführt. Sobald ein

Bildausschnitt mit einer höheren Genauigkeit analysiert werden muss, kann der Anwender das Bild pausieren. Das pausierte Bild wird dann nahtlos durch das genauere Kreismarkertracking ausgerichtet. Die Versorgung mit 3D-Modellen erfolgt über das weit verbreitete JT-Format. Durch einen integrierten Konverter werden die Daten in das vom Augmented Reality-System benötigte Datenformat umgewandelt. Die Untersuchung selbst kann anschließend sowohl Offline als auch Online erfolgen, der Unterschied liegt im Zeitpunkt der Bildaufnahme. Während die Offline-Analyse mit bereits im Vorfeld aufgenommenen Bildern und Videos arbeitet, bewegt sich der Anwender bei der Online-Analyse mit dem Tabletcomputer um das Untersuchungsobjekt herum und betrachtet das direkt überlagerte Live-Bild der Videokamera. Die erforderlichen Tätigkeiten zur Durchführung einer Augmented Reality-Untersuchung wurden in Form von Aktivitätsdiagrammen ausgestaltet. Um eine einfache Erlernbarkeit sicherzustellen, wurden die Benutzer in die beiden Gruppen Administrator und Anwender eingeteilt. Administratoren sind für die initiale Systemzusammenstellung und die Ersteinrichtung zuständig, die Anwender können sich auf Vorbereitung und Durchführung einer konkreten Untersuchung konzentrieren. Die Anforderungen an die Benutzerführung bildeten gemeinsam mit den Aktivitätsdiagrammen sowie den Benutzergruppen die Basis für die Ausgestaltung der Benutzerführung. Dabei wurde großer Wert auf ein durchgängiges und angenehmes Benutzererlebnis gelegt. Einfache und transparente Arbeitsabläufe sollen den Anwender bei seiner Arbeit unterstützen und die schnelle Erlernbarkeit sowie die intuitive Bedienbarkeit fördern.

6 Evaluierung

Dieses Kapitel evaluiert das entwickelte Augmented Reality-System AURA im Rahmen einer Probandenstudie und repräsentiert damit die vierte Phase im iterativen menschenzentrierten Gestaltungsprozess. In Abschnitt 3.4 wurde die Forschungshypothese aufgestellt, dass Augmented Reality-Systeme in ihren einzelnen Komponenten soweit ausgereift sind, dass der Einsatz für geometrische Analysen in der industriellen Produktentstehung auch durch unerfahrene Anwender einfach möglich ist, wenn der Schwerpunkt der Systementwicklung auf die Gebrauchstauglichkeit des Gesamtsystems gelegt wird. Zur Überprüfung soll die Forschungshypothese in einer Leitfrage für die Evaluierung formuliert werden:

Leitfrage Evaluierung: Kann das entwickelte Augmented Reality-System für geometrische Analysen in der Produktentstehung durch unerfahrene Anwender effektiv, effizient und zufriedenstellend genutzt werden?

Die Gebrauchstauglichkeit eines Systems kann immer nur in einem konkreten Nutzungskontext bewertet werden. Für die folgende Evaluierung wird als Anwendungsfall die Qualitätsbewertung eines komplexen Betriebsmittels ausgewählt (vgl. Abschnitt 4.1), die Analyse soll zu Vergleichszwecken sowohl online anhand eines Live-Videobildes als auch offline anhand von Fotos (vgl. Abschnitt 5.2.2) erfolgen.

6.1 Methodik

Die Gebrauchstauglichkeit des Augmented Reality-Systems soll mithilfe der System Usability Scale-Punktzahl bestimmt werden (vgl. Abschnitt 2.3.4). Die System Usability Scale ermöglicht allerdings nur die Aussage, ob und in welchem Grad Nutzerprobleme bestehen. Sie kann jedoch keine Auskunft darüber geben, welche Probleme konkret vorliegen. Daher werden neben der SUS auch Fragebögen und Interviews, Lautes Denken und Beobachtungen

sowie Zeitmessungen der einzelnen Prozessschritte eingesetzt. Der Einsatz dieser Methoden hat sich für Usability-Tests in der Praxis vielfach bewährt [RF13] [RCS11] [BKM08] [DR99].

6.1.1 System Usability Scale

Die technologisch unabhängige System Usability Scale (SUS) ermöglicht die schnelle und einfache globale Bewertung der Gebrauchstauglichkeit des Augmented Reality-Systems anhand von zehn Fragen, die durch die Nutzer auf einer Likert-Skala mit fünf Punkten von stimme gar nicht zu bis stimme voll zu bewertet werden. Die Bewertung durch die Probanden erfolgt subjektiv, wodurch die SUS eine geeignete Methode zur Ermittlung der Gesamtleistung des Augmented Reality-Systems unter besonderer Berücksichtigung der Zufriedenstellung der Nutzer darstellt. Der in der Probandenstudie zur Ermittlung der SUS-Punktzahl verwendete Fragebogen findet sich in Anhang B.

6.1.2 Fragebögen und Interviews

Das Vorwissen der Probanden in angrenzenden Disziplinen wie z. B. Bedienung von Computern, Smartphones und Tabletcomputern, Analyse von CAD-Daten, Erfahrung mit Koordinatenmesstechnik und Augmented Reality-Systemen wird durch einen Fragebogen ermittelt. Er befindet sich in Anhang A. Am Ende der Nutzerstudie werden die Probanden in einem Interview befragt, ob und aus welchen Gründen sie die Online- oder die Offline-Analyse bevorzugen.

6.1.3 Lautes Denken und Beobachtung

Die Probanden werden gebeten, während der Durchführung der Arbeitsaufgaben laut zu denken, also alles mitzuteilen, was ihnen positiv oder negativ auffällt, welche Funktion sie gerade suchen oder an welcher Stelle sie eventuell nicht weiterkommen. Da Probanden allerdings häufig unbewusst reagieren, werden die Kommentare des lauten Denkens durch Beobachtungen des Moderators ergänzt. Dabei können schon kleine Nuancen in der Körpersprache oder zögerndes Handeln auf Unsicherheiten oder Probleme in der Bedienung hinweisen. Die Kommentare und Beobachtungen werden durch den Moderator notiert.

6.1.4 Zeitmessungen

Die für die Vorbereitung und die Durchführung einer Augmented Reality-Analyse benötigte Zeit ist ein wichtiger Faktor für die Effizienz des entwickelten Systems und damit den tatsächlich erzielbaren Mehrwert im industriellen Einsatz. Die von den Probanden benötigte Zeit zur Durchführung der einzelnen Prozessschritte wird durch den Moderator gemessen und notiert.

6.2 Aufbau und Durchführung

Die Nutzerstudie wird in einem abgetrennten Bereich einer Fabrikhalle unter kontrollierten Lichtbedingungen durchgeführt. Anwesend sind nur der jeweilige Proband und der Moderator.

6.2.1 Materialien

Für die Durchführung der Probandenstudie werden ein Betriebsmittel, die zugehörigen CAD-Datensätze sowie die auf einem Blatt ausgedruckten Referenzpunkte für die Ausrichtung verwendet. Das eingesetzte Augmented Reality-System besteht aus einem Tabletcomputer, der entwickelten Augmented Reality-Software AURA, Quadratmarkern und Adaptern sowie einer Spiegelreflexkamera.

Betriebsmittel

Als Betriebsmittel wird die vordere Subpalette eines sogenannten Mechanisierungsrahmens entsprechend Abbildung 6.1 ausgewählt. Mechanisierungsrahmen werden in der Produktion durch Produktionsmitarbeiter mit Achsen, Abgasanlage, Motor, Getriebe etc. aufgerüstet. Die aufgelegten Aufrüstumfänge werden anschließend über Schraubspindeln mit der Karosserie verschraubt. Dieser Prozess wird in der Automobilindustrie auch als Hochzeit bezeichnet. Mechanisierungsrahmen stellen komplexe Betriebsmittel mit hohen Anforderungen an die Fertigungs- und Montagequalität dar und eignen sich daher gut für die Durchführung einer Qualitätsanalyse.

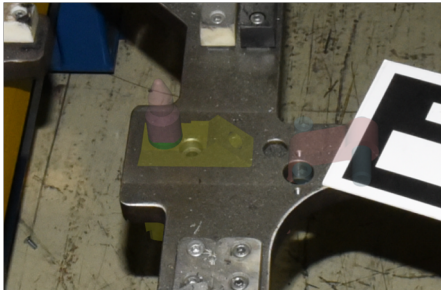


Abbildung 6.1: Untersuchungsobjekt Mechanisierungsrahmen

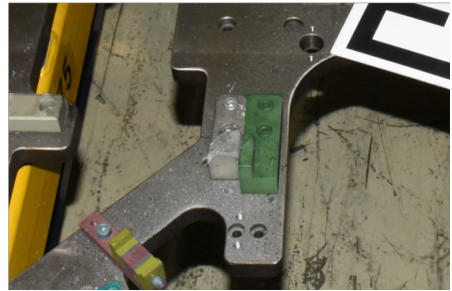
CAD-Datensätze

Bei der Untersuchung soll die Fertigungs- und Montagequalität des physischen Mechanisierungsrahmens (Ist-Zustand) anhand eines vorgegebenen CAD-Datensatzes (Soll-Zustand) geprüft werden. Für die Probandenstudie wurde der CAD-Datensatz des Mechanisierungsrahmens in drei Varianten mit jeweils vier verschiedenen Fehlerarten präpariert. Die drei Varianten werden randomisiert gleichverteilt während der Einweisung, der Online-Analyse und der Offline-Analyse verwendet.

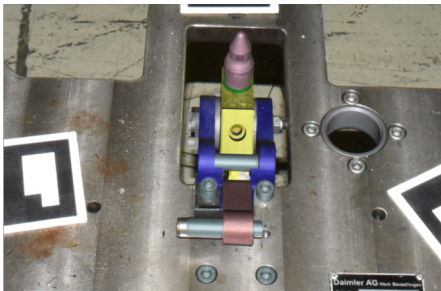
Abbildung 6.2 gibt einen Überblick der in jedem der drei CAD-Datensätze präparierten Fehlerarten. In Abbildung 6.2(a) ist zwar ein transparentes CAD-Objekt dargestellt, jedoch fehlt das physische Gegenstück. Es wurde z. B. bei der Montage vergessen. In Abbildung 6.2(b) ist es umgekehrt, hier ist ein physisches Objekt vorhanden, welches allerdings nicht im CAD-Datensatz abgebildet ist. Abbildung 6.2(c) zeigt eine Formabweichung, also eine Abweichung in der äußeren Kontur zwischen dem physischen und dem zugehörigen virtuellen Objekt. Der Bolzen an der physischen Höhenverstellung ist etwas zu kurz, er ist im virtuellen CAD-Datensatz länger dargestellt. In Abbildung 6.2(d) ist eine Lageabweichung zwischen physischem und virtuellem Objekt erkennbar. Hier wurde eine Auflagefläche gegenüber dem CAD-Datensatz verschoben montiert.



(a) Physisches Objekt fehlt



(b) Virtuelles Objekt fehlt



(c) Formabweichung



(d) Lageabweichung

Abbildung 6.2: Präparierte Fehlerarten

Ausrichtungspunkte

Bei einem Betriebsmittel wie dem Mechanisierungsrahmen existieren vorgegebene Referenzkoordinatensysteme, über welche die erforderlichen Maße zur Gewährleistung einer einwandfreien Funktion definiert sind. Die Überprüfung dieser Funktionsmaße muss immer in Bezug auf die vorgegebenen Referenzkoordinatensysteme erfolgen. Das bedeutet für die Augmented Reality-Untersuchung, dass die Markeradapter zur Ausrichtung des Trackingsystems auf bestimmte Bolzen und Bohrungen gesetzt werden müssen.

Da die Probanden das Betriebsmittel und die untersuchte Problemstellung nicht näher kennen, können sie nicht sicher beurteilen, welche Ausrichtungspunkte für die Untersuchung geeignet sind. Sie werden den Probanden daher gemeinsam mit den zugehörigen x -, y - und z -Koordinaten auf einem Blatt Papier entsprechend Abbildung 6.3 vorgegeben.

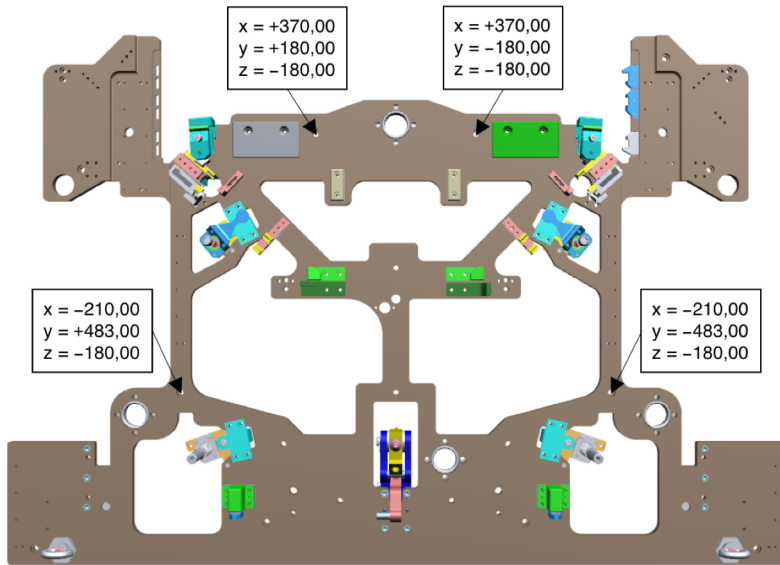


Abbildung 6.3: Ausrichtungspunkte auf vorderer Subpalette

Augmented Reality-System

Das eingesetzte Augmented Reality-System entspricht dem in Kapitel 5 aufgezeigten Stand. Lediglich der Dialog zur Erstellung von Untersuchungsprotokollen (vgl. Abbildung 5.24) wurde zum Evaluationszeitpunkt noch nicht umgesetzt und ist damit nicht Teil der Probandenstudie. Für die Untersuchung wird das Quadratmarkertracking eingesetzt. Insgesamt stehen 10 Quadratmarker mit einer Kantenlänge von 80 mm, 5 Quadratmarker mit einer Kantenlänge von 100 mm und 3 Quadratmarker mit einer Kantenlänge von 130 mm zur Verfügung. Die Marker sind als bedruckte Alu-Dibond-Platten ausgeführt. Als Adapter werden Drei-Backen-Handspannfutter der Firma Witte verwendet [HK18], welche entsprechend Abbildung 5.2 mit den Markern verbunden werden. Die Bilder für die Ausrichtung des Trackingsystems sowie für die Offline-Analyse werden mit einer digitalen Spiegelreflexkamera vom Typ Nikon D750 aufgenommen, welche mit einem Objektiv vom Typ Voigtländer Color-Skopar 20 mm F/3.5 SL ausgerüstet ist. Die Bilder werden per USB-Kabel auf den Tabletcomputer, ein Microsoft Surface 4 mit Core i7-Prozessor und 8 GB RAM, überspielt. Für die Online-Analyse wird die im Tabletcomputer integrierte Kamera eingesetzt.

6.2.2 Aufgaben

Die Probanden nehmen die Rolle eines Anwenders ein und sollen das Augmented Reality-System für die Untersuchung des Mechanisierungsrahmens vorbereiten sowie eine Online- und eine Offline-Analyse durchführen. Die Kamerakalibrierung sowie die Trackingkonfiguration wurden bereits im Vorfeld der Untersuchung durchgeführt. Da diese Schritte im produktiven Einsatz des Augmented Reality-Systems nicht durch den Anwender, sondern durch einen Administrator vorgenommen würden (vgl. Abschnitt 5.2.3), entspricht dies einem realistischen Einsatzszenario.

Untersuchung vorbereiten

Während der Vorbereitung wird das System durch die Probanden aufgebaut und eingerichtet. Zunächst müssen für die Ausrichtung des Quadratmarker-trackings entsprechend dem Aktivitätsdiagramm in Abbildung 5.9 die Marker und Adapter auf dem Untersuchungsobjekt platziert und mit einer Kamera abgelenkt werden. Zur Sicherstellung einer hohen Überlagerungsgenauigkeit werden die Bilder zur Ausrichtung mit der Spiegelreflexkamera aufgenommen. Anschließend werden die Bilder per USB-Kabel auf den Tabletcomputer überspielt. Nach dem Start der AURA-Software wird ein neues Projekt angelegt, den Dialog in der Anwendung zeigt Abbildung 5.16. Die CAD-Daten müssen entsprechend dem Aktivitätsdiagramm in Abbildung 5.7 lediglich ausgewählt werden, die Konvertierung in das vom Renderer benötigte Datenformat erfolgt automatisch. Den zugehörigen Dialog in der Anwendung zeigt Abbildung 5.17. Die Ausrichtung der Marker wird mithilfe von Adaptern durchgeführt. Nach der Eingabe der zwölf Soll-Koordinaten (jeweils x -, y - und z -Koordinate für insgesamt vier Referenzpunkte) müssen die Marker und Adapter den entsprechenden Soll-Koordinaten zugeordnet werden. Abbildung 5.18 beschreibt den entsprechenden Dialog. Anschließend sind die zur Ausrichtung mit der Spiegelreflexkamera aufgenommenen Bilder einzulesen. Mit diesen Informationen wird die Ausrichtung der Quadratmarker berechnet. Den zugehörigen Dialog zeigt Abbildung 5.19.

Untersuchung durchführen

An die Vorbereitung schließt sich entsprechend dem Aktivitätsdiagramm in Abbildung 5.11 die eigentliche Untersuchung an. Abbildung 5.20 zeigt den Dialog in der Anwendung. Die Probanden führen sowohl eine Online- als auch eine Offline-Untersuchung durch. Bei der Offline-Untersuchung müssen zunächst

die Fotos für die Analyse aufgenommen werden. Für die Aufnahme wird die Spiegelreflexkamera genutzt, anschließend werden die Fotos auf den Tabletcomputer überspielt. Bei der Online-Analyse kann nach der Vorbereitung direkt mit der Analyse begonnen werden. Die Probanden bewegen sich dazu mit dem Tabletcomputer um den Mechanisierungsrahmen herum und analysieren das überlagerte Live-Kamerabild. Für die Analyse werden sowohl online als auch offline die Drahtgitter-, die Verdeckungs- sowie die transparente Darstellung virtueller Objekte eingesetzt.

6.2.3 Ablauf

Zu Beginn der Probandenstudie werden die Teilnehmer über Zweck, Inhalt und Ablauf informiert. Anschließend füllen sie den Fragebogen zum Vorwissen in Anhang A aus. Den Probanden wird eine Einweisung in das Augmented Reality-System gegeben. Die Vorbereitung, die Offline-Analyse und die Online-Analyse werden Schritt für Schritt erklärt und gemeinsam mit den Probanden durchgeführt. Die Probanden können beliebig viele Fragen zum Vorgehen und zum System stellen, allerdings ist die Einweisung auf maximal 60 Minuten pro Person begrenzt.

Die Probanden führen die Vorbereitung, die Online- und die Offline-Analyse durch, wobei die Reihenfolge von Online- und Offline-Analyse sowie die dafür genutzten CAD-Datensätze über alle Probanden randomisiert gleichverteilt sind. Die Vorbereitung wird je Proband lediglich einmal durchgeführt und das Ergebnis sowohl für die Online- als auch für die Offline-Analyse verwendet. Der verwendete CAD-Datensatz wird nach dem ersten Analysedurchlauf durch den Moderator getauscht. Nach Beendigung der Untersuchung füllen die Probanden den Fragebogen zur Ermittlung der System Usability Scale-Punktzahl aus und werden anschließend zum allgemeinen Systemeindruck sowie zum Vergleich zwischen Online- und Offline-Analyse befragt.

6.3 Hypothesen

Um die zu Beginn des Kapitels formulierte Leitfrage weiter zu konkretisieren, werden zu den drei Qualitätskriterien Effektivität, Effizienz sowie Zufriedenstellung jeweils Einzelhypothesen aufgestellt.

6.3.1 Effektivität

Effektivität beschreibt den Grad der Aufgabenerfüllung gegenüber einem gesetzten Ziel. Bezüglich der Effektivität der Vorbereitung und der Online- bzw. Offline-Analyse werden zwei Hypothesen aufgestellt:

Hypothese Vorbereitung: Die Probanden führen die Vorbereitung vollständig durch und erhalten als Ergebnis ein korrekt auf das Untersuchungsobjekt ausgerichtetes Quadratmarkertracking.

Hypothese Untersuchung: Die Probanden finden sowohl in der Online- als auch in der Offline-Analyse alle präparierten Abweichungen zwischen CAD-Modell und physischem Betriebsmittel und dokumentieren diese erfolgreich durch Screenshots.

6.3.2 Effizienz

Effizienz beschreibt den Grad der Aufgabenerfüllung im Verhältnis zum eingesetzten Aufwand. Dabei kann zwischen dem zeitlichen Aufwand für die Vorbereitung und die Analyse sowie dem Schulungsaufwand, also der zur Qualifikation benötigten Zeit, unterschieden werden. Bezüglich der Effizienz werden zwei Hypothesen aufgestellt:

Hypothese Erlernbarkeit: Auch Probanden, die keinerlei Vorwissen auf dem Gebiet Augmented Reality haben, können den eigenständigen Umgang mit dem Augmented Reality-System in maximal 60 Minuten erlernen.

Hypothese Zeitaufwand: Die Probanden benötigen für die Vorbereitung, die Online- und die Offline-Analyse jeweils maximal 30 Minuten.

6.3.3 Zufriedenstellung

Die Zufriedenstellung der Anwender ist ein völlig subjektives Qualitätskriterium und beinhaltet das gesamte Benutzererlebnis vor, während und nach der Arbeit mit dem Augmented Reality-System. Die System Usability Scale-Punktzahl bewertet die globale Gebrauchstauglichkeit des Augmented Reality-Systems aus subjektiver Sicht des Anwenders und ist dadurch eine geeignete Kennzahl, um

die subjektive Zufriedenstellung zu quantifizieren. Die Hypothese zur Zufriedenstellung soll daher mithilfe der System Usability Scale-Punktzahl formuliert werden:

Hypothese Zufriedenstellung: Die Anwender bewerten die Gebrauchstauglichkeit des Augmented Reality-Systems mindestens als gut, die SUS-Punktzahl ist also gleich oder größer als 72,75.

Die formulierten Hypothesen decken alle relevanten Bestandteile der Gebrauchstauglichkeit ab. Lassen sie sich verifizieren, kann das Augmented Reality-System mit großer Wahrscheinlichkeit im Sinne der Leitfrage effektiv, effizient und zufriedenstellend für geometrische Analysen in der Produktentstehung genutzt werden.

6.4 Auswertung

Um die Ergebnisse der Probandenstudie besser interpretieren zu können werden zunächst Alter, Geschlecht und Vorwissen der teilnehmenden Probanden ausgewertet. Anschließend werden zur Einschätzung der Gebrauchstauglichkeit die fünf Hypothesen aus den Themenbereichen Effektivität, Effizienz und Zufriedenstellung überprüft.

6.4.1 Probanden

An der Probandenstudie nahmen insgesamt zehn Personen teil, drei Frauen und sieben Männer. Sechs Personen waren zwischen 20 und 30 Jahre, zwei Personen zwischen 30 und 40 Jahre und zwei Personen über 50 Jahre alt. Der Altersdurchschnitt betrug $32,5 \pm 12$ Jahre. Abbildung 6.4 fasst die Antworten aus dem Fragebogen zum Vorwissen in Form von Mittelwert und Standardabweichung zusammen. Die zugehörige Antwortverteilung findet sich in Anhang A.

Die meisten Probanden haben viel Erfahrung im Umgang mit Computern, Smartphones und Tabletcomputern und sind neuen Technologien gegenüber sehr aufgeschlossen. Einige haben etwas Erfahrung im Umgang mit CAD-Systemen und der Analyse von CAD-Daten, auch in der Verwendung von Koordinatenmesstechnik kennen sich manche Anwender etwas aus. Zwei Probanden haben sehr geringe Erfahrung im Umgang mit Augmented Reality-Systemen, die meisten Probanden haben auf diesem Gebiet jedoch keinerlei Vorwissen. Kein Proband hat das hier untersuchte Augmented Reality-System AURA zuvor genutzt.

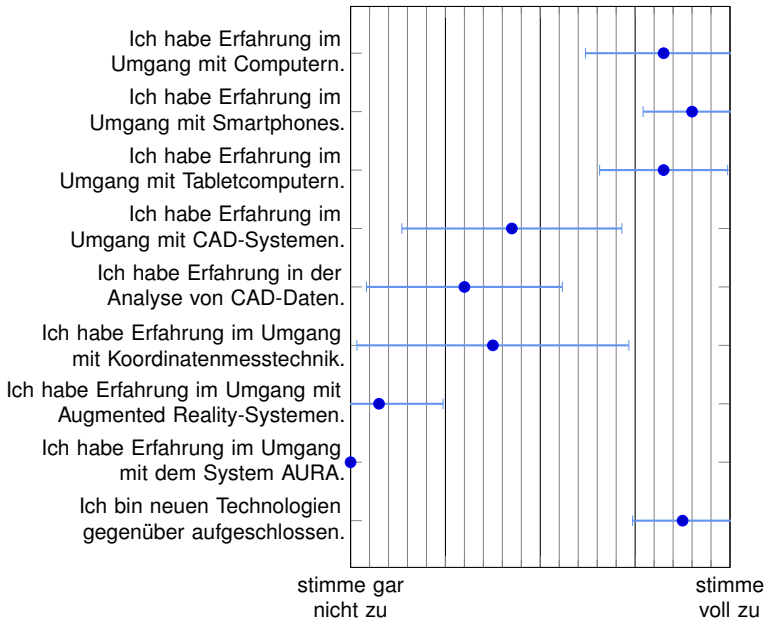


Abbildung 6.4: Ergebnisse des Fragebogens zum Vorwissen

6.4.2 Effektivität

Die Vorbereitung wurde durch alle Probanden korrekt durchgeführt. **Hypothese Vorbereitung** kann damit angenommen werden. In der Online-Analyse haben alle Probanden alle vier präparierten Abweichungen gefunden, was einer Gesamteffektivität von 100 % entspricht. In der Offline-Analyse haben neun Probanden ebenfalls alle vier präparierten Abweichungen gefunden, ein Proband hat jedoch die Fehlerart CAD-Objekt fehlt nicht erkannt. Dieses Ergebnis entspricht einer Gesamteffektivität von 39 erkannten zu 40 präparierten Abweichungen bzw. 97,5%. **Hypothese Untersuchung** kann zwar für die Online-Analyse angenommen, muss aber für die Offline-Analyse abgelehnt werden.

6.4.3 Effizienz

Die Vorbereitung, die Online- und die Offline-Absicherung wurden durch alle Probanden eigenständig und ohne Hilfestellungen durch den Moderator durch-

geführt. Alle Probanden waren in der Lage, das System nach einer Einweisung von maximal 60 Minuten selbstständig zu bedienen. Ein Proband hat eine präparierte Abweichung zwar nicht erkannt, dies ist jedoch nicht auf Probleme in der Systembedienung zurückzuführen. Damit kann **Hypothese Erlernbarkeit** angenommen werden.

Dauer Untersuchung vorbereiten

Abbildung 6.5 zeigt die Dauer der Vorbereitung je Proband und Teilschritt. Die gesamte Vorbereitung hat mindestens 11 min 14 s und höchstens 17 min 50 s gedauert, im Mittel $13 \text{ min } 35 \text{ s} \pm 2 \text{ min } 2 \text{ s}$. **Hypothese Zeitaufwand** kann damit für die Vorbereitung angenommen werden. Am längsten dauerten das Aufnehmen und Überspielen der Bilder mit $5 \text{ min } 5 \text{ s} \pm 1 \text{ min } 40 \text{ s}$, die Eingabe der zwölf für die Ausrichtung benötigten Soll-Koordinaten mit $3 \text{ min } 23 \text{ s} \pm 38 \text{ s}$ und das Platzieren der Adapter und Marker mit $2 \text{ min } 28 \text{ s} \pm 59 \text{ s}$. Die Auswahl der mit der Spiegelreflexkamera aufgenommenen Bilder und die anschließende Berechnung der Ausrichtung durch das Augmented Reality-System dauerte $1 \text{ min } 50 \text{ s} \pm 22 \text{ s}$. Eher schnell konnten das Anlegen eines neuen Projektes mit $28 \text{ s} \pm 11 \text{ s}$ und das Laden der CAD-Daten mit $21 \text{ s} \pm 6 \text{ s}$ durchgeführt werden.

Dauer Offline-Untersuchung durchführen

Abbildung 6.6 zeigt die Dauer der Offline-Analyse je Proband und Prozessschritt. Die gesamte Offline-Analyse hat mindestens 12 min 17 s und höchstens 24 min 43 s gedauert. Mittelwert und empirische Standardabweichung der Offline-Analyse betragen $15 \text{ min } 50 \text{ s} \pm 3 \text{ min } 53 \text{ s}$. **Hypothese Zeitaufwand** kann damit für die Offline-Untersuchung angenommen werden. Die Tätigkeit Bilder aufnehmen, überspielen und auswählen dauerte im Mittel $4 \text{ min } 2 \text{ s} \pm 1 \text{ min } 20 \text{ s}$ und die Tätigkeit Analyse durchführen und dokumentieren $11 \text{ min } 47 \text{ s} \pm 2 \text{ min } 52 \text{ s}$.

Dauer Online-Untersuchung durchführen

Abbildung 6.7 zeigt die Dauer der Online-Analyse je Proband. Da die Absicherung live mithilfe der Videokamera erfolgt, entfällt der Zeitaufwand für die Bildaufnahme gegenüber der Offline-Analyse. Die Bildaufnahme in Form des Live-Videos und die Analyse erfolgen simultan. Die gesamte Online-Analyse hat mindestens 4 min 32 s und höchstens 10 min 2 s gedauert, Mittelwert und empirische Standardabweichung betragen $6 \text{ min } 43 \text{ s} \pm 1 \text{ min } 55 \text{ s}$. **Hypothese Zeitaufwand** wird damit für die Online-Untersuchung ebenfalls bestätigt.

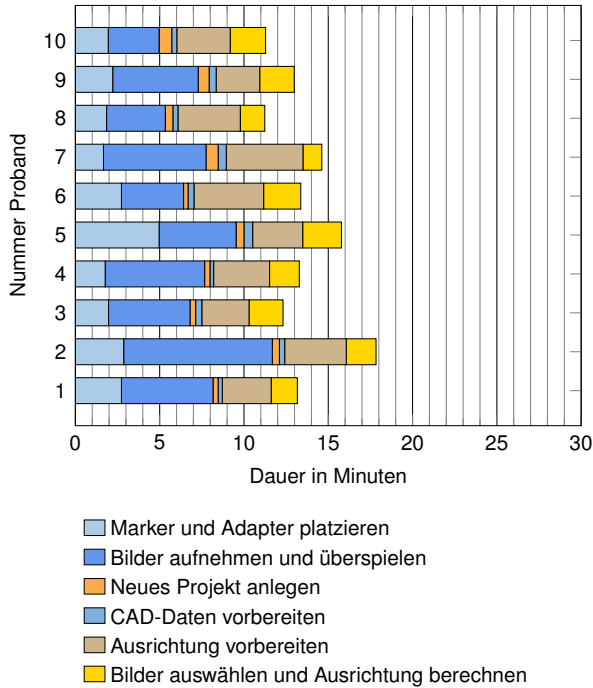


Abbildung 6.5: Dauer der Vorbereitung je Proband und Prozessschritt

6.4.4 Zufriedenstellung

Durch das laute Denken und die Beobachtung der Probanden während der Untersuchung wurden wichtige Erkenntnisse über mögliche Benutzerprobleme und Verbesserungspotenziale des Augmented Reality-Systems gewonnen, von denen die wichtigsten kurz vorgestellt werden sollen.

Zufriedenstellung Untersuchung vorbereiten

Zunächst hatten einige Probanden Probleme bei der Beurteilung, ob für die Ausrichtung und das anschließende Tracking genügend Marker auf dem Betriebsmittel angebracht wurden. Auch die Beurteilung, ob ausreichend Bilder aus passenden Blickwinkeln aufgenommen wurden, fiel einigen Probanden schwer. Zwei Probanden gaben an, dass ihnen die Spiegelreflexkamera zu schwer für einen längeren Einsatz wäre. Die Schrift und die Symbole der Applikation wurden

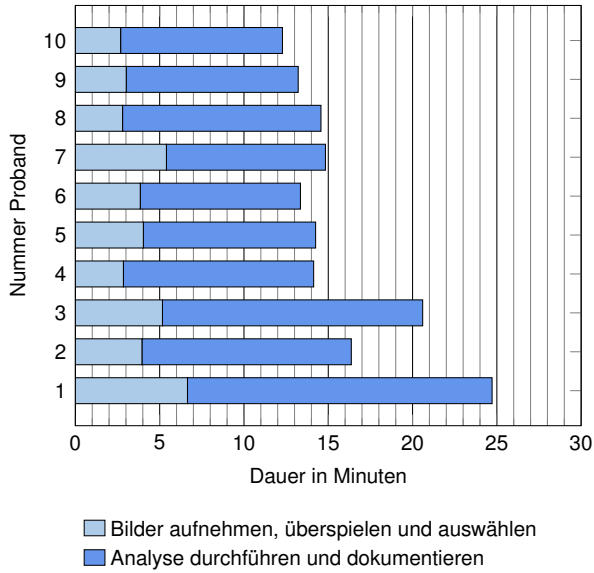


Abbildung 6.6: Dauer der Offline-Analyse je Proband und Prozessschritt

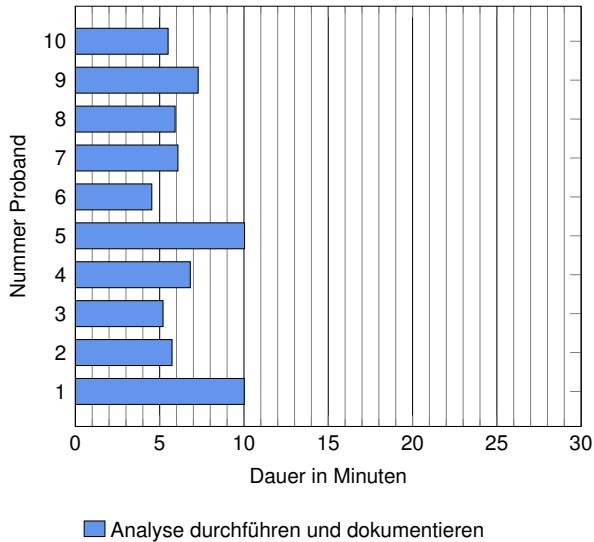


Abbildung 6.7: Dauer der Online-Analyse je Proband und Prozessschritt

durch zwei Probanden als zu klein empfunden. Sie wünschten sich die Möglichkeit, die Schrift- und Symbolgröße verändern zu können. Zwei Probanden waren unsicher, ob das automatische Speichern des Projektes im Hintergrund auch tatsächlich durchgeführt wurde. Sie wünschten sich eine zusätzliche manuelle Möglichkeit zum Abspeichern des Projektes. Ein Proband hatte Schwierigkeiten bei der Befestigung der Adapter auf dem Mechanisierungsrahmen. Insgesamt wurde beobachtet, dass die Eingabe der Koordinaten sowie das Zuordnen der korrekten Marker und Adapter viel Zeit und Konzentration erforderten. Trotzdem führten alle Probanden die Vorbereitung beim ersten Mal fehlerfrei durch und beurteilten den Prozess rückblickend als einfach.

Zufriedenstellung Untersuchung durchführen

Die Untersuchung selbst wurde durch die Probanden sowohl online als auch offline insgesamt als einfach und angenehm empfunden. Viele Probanden benutzen zur Beurteilung der präparierten Fehler die transparente Darstellung der virtuellen Objekte, indem sie die Transparenz über den Drehregler abwechselnd hoch und runter regelten. Zwei Probanden wünschten sich dazu die Möglichkeit einer automatisch pulsierenden Darstellung der virtuellen Elemente, sodass der Drehregler für die Transparenz nicht mehr bedient werden muss. Der Drahtgittermodus wurde hingegen nur durch wenige Probanden eingesetzt. Bei fast allen Probanden konnte beobachtet werden, dass das fehlende virtuelle Objekt sowohl im Online- als auch im Offline-Modus erst nach den übrigen Fehlerarten gefunden wurde. Ein Proband hat diesen Fehler in der Offline-Analyse gar nicht erkannt. Scheinbar wird das Erkennen eines fehlenden virtuellen Objektes dadurch erschwert, dass die Aufmerksamkeit der Probanden stark auf die optisch auffälligeren virtuellen Objekte fokussiert ist. Bei der Offline-Analyse fiel einigen Probanden die Orientierung in der Quellgalerie schwer. Sie bemängelten eine aus ihrer Sicht zu kleine Darstellung der Vorschaubilder sowie deren Sortierung, welche das neueste Bild unten und nicht oben in der Galerie anzeigt. Die Probanden wünschten sich die Möglichkeit, Größe und Sortierung der Aufnahmen frei anpassen zu können.

Vergleich Zufriedenstellung Online / Offline

Neun von zehn Nutzern favorisierten die Online-Analyse gegenüber der Offline-Analyse. Als häufigster Vorteil der Online-Analyse wurde genannt, dass das Finden der richtigen Perspektive während der Untersuchung schnell und einfach möglich ist. Ist die Perspektive während der Online-Analyse nicht optimal, kann sie schnell durch Bewegen des Tabletcomputers gewechselt werden, während gleichzeitig die Überlagerung betrachtet wird. Bei der Offline-Analyse ist die

korrekte Perspektive hingegen schon bei der Aufnahme der Bilder mit der Spiegelreflexkamera zu beachten, ohne dass die Überlagerung direkt geprüft werden kann. Das aufgenommene Bild muss dann noch in der Quellgalerie gesucht werden. Dadurch wechselten die Probanden häufig zwischen verschiedenen Bildern hin und her, bis eine möglichst passende Ansicht für die Beurteilung eines konkreten Umfangs gefunden war. In der Online-Analyse entfiel dieser Schritt, was sich auch in der insgesamt deutlich kürzeren Durchführungszeit widerspiegelt.

SUS-Punktzahl

Abschließend soll die aus den Fragebögen der Probanden ermittelte System Usability Scale-Punktzahl betrachtet werden. Eine Übersicht der Antwortverteilung findet sich in Anhang B. In der durchgeführten Probandenstudie wurde für das Augmented Reality-System AURA eine SUS-Punktzahl von 91,75 erzielt. **Hypothese Zufriedenstellung** kann damit angenommen werden.

Auch wenn die theoretisch erreichbare Punktzahl von 0 bis 100 reicht, darf diese nicht als eine prozentuale Bewertung der Gebrauchstauglichkeit missverstanden werden (vgl. Abschnitt 2.3.4). Zur näheren Einordnung des Ergebnisses wird daher Abbildung 6.8 betrachtet. Die SUS-Punktzahl von 91,75 entspricht im amerikanischen Schulnotensystem der exzellenten Bewertung A-, im deutschen Sprachraum also der sehr guten Bewertung 1-.

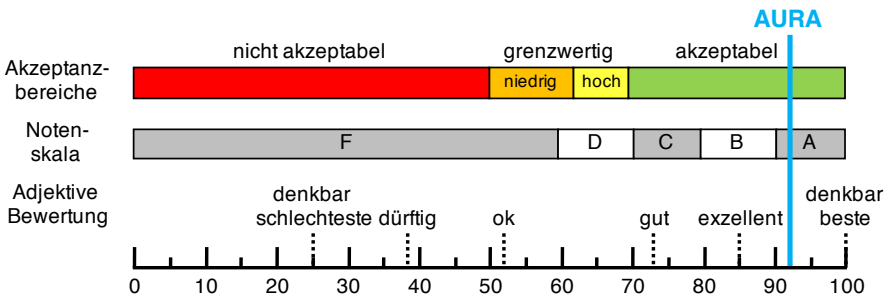


Abbildung 6.8: Ergebnis SUS-Punktzahl, in Anlehnung an [BKM08]

Insgesamt konnten vier der fünf aufgestellten Hypothesen vollständig bestätigt werden. Die Hypothese zur Effektivität der Untersuchung ließ sich nur für die Online-Analyse bestätigen. In der Offline-Analyse hat ein Proband einen der präparierten Fehler nicht gefunden. Dennoch ist das Gesamtergebnis der

Offline-Analyse mit insgesamt 39 erkannten zu 40 präparierten Abweichungen auf einem guten Niveau. Die eingangs gestellte *Leitfrage Evaluierung* lässt sich damit positiv beantworten: Das entwickelte Augmented Reality-System kann auch durch unerfahrene Anwender effektiv, effizient und zufriedenstellend für geometrische Analysen in der Produktentstehung genutzt werden.

6.5 Zusammenfassung

Zur Evaluierung der Gebrauchstauglichkeit des entwickelten Augmented Reality-Systems wurde eine Probandenstudie durchgeführt. Die Leitfrage lautete: Kann das entwickelte Augmented Reality-System zur Analyse geometrischer Problemstellungen im Produktentstehungsprozess effektiv, effizient und zufriedenstellend genutzt werden?

Um diese Fragestellung zu untersuchen, wurde mit insgesamt zehn Probanden eine Qualitätsanalyse an einem Betriebsmittel durchgeführt. Die Probanden hatten nach einer kurzen Einführung zunächst die Aufgabe, das System einzurichten, anschließend führten sie eine Offline- und eine Online-Analyse durch. Keiner der Probanden hatte Erfahrung im Umgang mit dem entwickelten Augmented Reality-System. Trotzdem waren alle Teilnehmer nach der weniger als 60-minütigen Einführung in der Lage, die Vorbereitung und die Online- sowie die Offline-Analyse selbstständig durchzuführen. Die Vorbereitung, die Online- und die Offline-Analyse waren im Mittel in jeweils unter 30 Minuten möglich. In der Online-Analyse fanden alle Probanden alle präparierten Fehlerarten, was einer Gesamteffektivität von 100 % entspricht. In der Offline-Analyse fanden lediglich neun von zehn Probanden alle präparierten Fehlerarten, ein Proband hat die Fehlerart CAD-Objekt fehlt nicht gefunden. Für die Offline-Analyse wurde somit eine Gesamteffektivität von 97,5 % erreicht.

Insgesamt empfanden die Probanden die Arbeit mit dem Augmented Reality-System als angenehm und einfach. Die erreichte System Usability-Scale-Punktzahl von 91,75 bescheinigt dem Gesamtsystem eine sehr gute Gebrauchstauglichkeit und unterstreicht die hohe Zufriedenstellung der Probanden. Die Leitfrage zur Evaluierung kann somit positiv beantwortet werden: Das entwickelte Augmented Reality-System lässt sich auch durch unerfahrene Anwender effektiv, effizient und zufriedenstellend für die geometrische Problemanalyse nutzen.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Im Folgenden werden das Vorgehen sowie die Ergebnisse zusammengefasst und ein Ausblick auf mögliche zukünftige Arbeiten gegeben.

7.1 Zusammenfassung

Augmented Reality besitzt in der Produktentstehung das Potenzial zur Synchronisierung physischer und virtueller Entwicklungsaktivitäten. Mithilfe von Augmented Reality ist es möglich, physische und virtuelle Modelle des Produktes und des Produktionssystems in einer gemeinsamen Welt darzustellen und ihr geometrisches Zusammenspiel visuell zu analysieren. Augmented Reality wurde daher in vielen verschiedenen Forschungsvorhaben ein erheblicher Mehrwert sowohl für die Produkt- als auch die Produktionssystementwicklung bescheinigt. Trotzdem wird Augmented Reality bis heute selten für die geometrische Analyse in der Produktentstehung eingesetzt. Daher wurde zu Beginn der Arbeit folgende Forschungsfrage gestellt:

Forschungsfrage: Welche Faktoren verhindern den breiten Praxiseinsatz von Augmented Reality für geometrische Analysen und wie kann die Technologie in der Produktentstehung umfassend nutzbar gemacht werden?

Um diese Frage zu beantworten, wurden in Kapitel 3 zunächst die grundlegenden Anwendungsfälle vorgestellt und in die Umfeld- und die Qualitätsanalyse eingeteilt. Mithilfe einer Qualitätsanalyse lassen sich Abweichungen zwischen physischen Objekten und ihrem virtuellen Gegenstück erkennen. Mithilfe einer Umfeldanalyse werden lediglich virtuell existierende Varianten in ihrer physischen Zielumgebung visualisiert. Insgesamt konnte sowohl für die Produkt- als auch die Produktionssystementwicklung eine potenziell positive Wirkung von

Augmented Reality auf die drei Wettbewerbsfaktoren Qualität, Zeit und Kosten festgestellt werden.

Zur Durchführung von Augmented Reality-Analysen existieren verschiedene Systemlösungen, die sich vorrangig durch das eingesetzte Trackingsverfahren unterscheiden. In diesem Zusammenhang wurden vier aus der Literatur bekannte Systeme mit Inside-out-Quadratmarkertracking, Outside-in-Baummarkertracking, mechanischem Tracking und Lasertracking vorgestellt. Die in den Systemen eingesetzten Untersuchungswerkzeuge zur Analyse des Zusammenspiels von physischen und virtuellen Modellen sind bei allen betrachteten Augmented Reality-Systemen weitestgehend identisch und können in Darstellungs-, Transformations- und Messwerkzeuge unterteilt werden.

Als wesentlicher Grund für die geringe Verbreitung von Augmented Reality für geometrische Analysen wurde die mangelnde Gebrauchstauglichkeit der eingesetzten Systemlösungen identifiziert. Industrielle Augmented Reality-Systeme für geometrische Analysen sind in der Regel Expertensysteme, deren Betrieb viel Augmented Reality-Fachwissen voraussetzt. Für die Einrichtung der Systeme ist häufig eine Vielzahl unterschiedlicher Softwareprogramme notwendig, etwa zur Kalibrierung der Systemkomponenten, zur Konvertierung der zu visualisierenden CAD-Daten oder zur Ausrichtung des Trackingsystems auf ein Untersuchungsobjekt. Mit Blick auf die eingangs gestellte Forschungsfrage wurde daher folgende Forschungshypothese formuliert:

Forschungshypothese: Augmented Reality-Systeme sind in ihren einzelnen technischen Komponenten so weit ausgereift, dass die Nutzung für geometrische Analysen in der industriellen Produktentstehung auch durch unerfahrene Anwender einfach möglich ist, wenn der Schwerpunkt der Systementwicklung auf die Gebrauchstauglichkeit des Gesamtsystems gelegt wird.

Zur Entwicklung eines gebrauchstauglichen Augmented Reality-Systems wurde der menschenzentrierte Gestaltungsprozess ausgewählt. Folglich wurden in Kapitel 4 zunächst der spätere Nutzungskontext mit den Anwendungszielen, den erwarteten Benutzern und der physischen, technischen und organisatorischen Einsatzumgebung beschrieben. Auf dieser Basis wurden die funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen an ein gebrauchstaugliches Augmented Reality-System formuliert. Neben der benötigten Überlagerungsgenauigkeit und dem erforderlichen Arbeitsraum sind als wesentliche Erfolgskriterien für ein gebrauchstaugliches Augmented Reality-System die einfache Erlernbarkeit sowie ein durchgängiges und positives Benutzererlebnis hervorzuheben. Um die Anforderungen bei der Komponentenauswahl gezielt berücksichtigen zu können,

wurde der Einfluss der einzelnen Anforderungen auf die einzelnen Komponenten eines optischen Augmented Reality-Systems ermittelt.

In Kapitel 5 wurden zunächst die möglichen Systemkomponenten unter Berücksichtigung der jeweils relevanten Anforderungen bewertet und entsprechend ausgewählt. Die Hardwarebasis für das zu entwickelnde System bildet ein Tabletcomputer. Tabletcomputer vereinen alle zur Durchführung eine Augmented Reality-Analyse erforderlichen Komponenten. Die am Tabletcomputer angebrachte Videokamera filmt die physische Umgebung, das überlagerte Videobild wird auf dem Touchscreen, mit welchem auch die Eingaben getätigt werden, visualisiert. Das von der Videokamera aufgenommene Bild wird außerdem für ein optisches Inside-out-Markertracking genutzt. Da die aus der Literatur bekannten Quadratmarkertracker die für geometrische Analysen geforderte Überlagerungsgenauigkeit üblicherweise nicht bzw. nur in einem eng begrenzten Arbeitsraum erreichen, wurde das Quadratmarkertracking durch ein photogrammetrisches Kreismarkertracking mit Bündelblockausgleichung ergänzt. Dieser aus der industriellen Messtechnik bekannte Ansatz ermöglicht sowohl die robuste Kalibrierung der eingesetzten Kamera als auch die hochgenaue Bestimmung der Kameralage gegenüber dem betrachteten Objekt und damit hochgenaue Augmented Reality-Überlagerungen. Da der Ansatz allerdings nicht echtzeitfähig ist, wurde er mit einem Quadratmarkertracking in Form eines hybriden Trackingansatzes kombiniert. Während einer Live-Analyse wird das Quadratmarkertracking genutzt. Sobald der Anwender das Bild pausiert, um einen bestimmten Bildausschnitt genauer zu analysieren, wird nahtlos auf das hochgenaue Kreismarkertracking umgeschaltet. Durch die Kombination der beiden Trackingansätze können die fehlende Genauigkeit des Quadratmarkertrackings und die fehlende Echtzeitfähigkeit des Kreismarkertrackings optimal kompensiert werden.

Die sich aus der Auswahl der Systemkomponenten ergebenden Prozessschritte wurden durch Aktivitätsdiagramme beschrieben. Das erforderliche Augmented Reality-Fachwissen wurde für jeden einzelnen Prozessschritt bewertet und bildete gemeinsam mit einer zeitlichen Strukturierung der Arbeitsabläufe die Basis für die Aufteilung der Benutzer in die beiden Benutzergruppen Anwender und Administrator. Administratoren sind für die eher wissensintensive initiale Kalibrierung des Augmented Reality-Systems verantwortlich. Der Anwender kann sich dadurch vollständig auf Vorbereitung und Durchführung einer konkreten Untersuchung konzentrieren. Durch die Aufteilung der Benutzergruppen lassen sich das für eine Augmented Reality-Analyse erforderliche Fachwissen und folglich auch der für einen Anwender erforderliche Schulungsaufwand erheblich reduzieren.

Auf Basis der Aktivitätsdiagramme und der beiden Benutzergruppen wurden die Anforderungen an eine Benutzerführung formuliert. Aus den Anforderungen wurde mithilfe des strukturierten Gesamtprozesses eine grafisch ansprechende, durchgängige und einfach erlernbare Benutzerführung entwickelt, welche den Anwender durch den gesamten Prozess von der Vorbereitung über die Untersuchung hin zur Dokumentation führt.

Schließlich wurde das entwickelte Augmented Reality-System in Kapitel 6 im Rahmen einer Probandenstudie mit zehn Teilnehmern bezüglich seiner Gebrauchstauglichkeit evaluiert. Um die Forschungshypothese zu überprüfen, wurde für die Evaluierung folgende Leitfrage formuliert:

Leitfrage Evaluierung: Kann das entwickelte Augmented Reality-System für geometrische Analysen in der Produktentstehung durch unerfahrene Anwender effektiv, effizient und zufriedenstellend genutzt werden?

Als Anwendungsfall für die Evaluierung wurde die Qualitätsanalyse eines komplexen Betriebsmittels ausgewählt. Keiner der zehn Probanden hatte Erfahrung im Umgang mit dem entwickelten Augmented Reality-System. Die Teilnehmer bekamen eine höchstens 60-minütige Einführung in die Systembedienung und führten anschließend die Vorbereitung sowie die Online- und die Offline-Analyse selbstständig und ohne Hilfestellungen durch. Sowohl die Vorbereitung als auch die Online- und die Offline-Untersuchung konnten durch alle Probanden in jeweils weniger als 30 Minuten durchgeführt werden. Da die Wahl einer zielführenden Perspektive zur Beurteilung der Überlagerung in der Online-Analyse deutlich einfacher als in der Offline-Analyse ist, wurde diese von 90 % der Probanden bevorzugt.

Insgesamt empfanden die Probanden die Arbeit mit dem System als einfach und können sich sehr gut vorstellen, das System zukünftig für geometrische Analysen einzusetzen. Die im Rahmen der Probandenstudie ermittelte SUS-Punktzahl von 91,75 unterstreicht sowohl die Zufriedenheit der Anwender als auch die insgesamt sehr gute Gebrauchstauglichkeit des entwickelten Systems. Die zuvor aufgestellte Hypothese wird damit durch den Probandentest bestätigt: Augmented Reality-Systeme sind in ihren einzelnen Komponenten so weit ausgereift, dass die Nutzung für geometrische Analysen in der Produktentstehung auch durch unerfahrene Anwender einfach möglich ist, wenn der Schwerpunkt der Systementwicklung auf die Gebrauchstauglichkeit des Gesamtsystems gelegt wird. Die vorliegende Arbeit leistet damit einen wichtigen Beitrag zur weitreichenden produktiven Etablierung von Augmented Reality für geometrische Analysen in der Produktentstehung.

7.2 Ausblick

Das entwickelte Augmented Reality-System AURA befindet sich mittlerweile in der unternehmensweiten Rollout-Phase. Mithilfe der Rückmeldungen aus dem Praxiseinsatz und weiteren Probandenstudien soll die Gebrauchstauglichkeit auch in Zukunft weiter verbessert werden.

Wesentliches Entwicklungspotenzial besteht zunächst bei der Datenversorgung des Augmented Reality-Systems. Aktuell werden die CAD-Daten aus dem PDM-System im JT-Format auf einen Datenträger exportiert und von dort in die Augmented Reality-Anwendung eingelesen und konvertiert. Das Speichern der CAD-Daten direkt auf dem Tabletcomputer oder einem externen Datenträger kann allerdings, gerade bei sensiblen Entwicklungsdaten zukünftiger Produkte, zu datenschutztechnischen Problemen führen. Hierfür soll das Augmented Reality-System zukünftig dahingehend weiterentwickelt werden, dass der Tabletcomputer lediglich für Interaktion, Bildaufnahme und Darstellung verwendet wird, die Berechnung der darzustellenden virtuellen Objekte aber bei Bedarf auf unternehmensinterne Server ausgelagert werden kann. Gerade beim Einsatz bei Lieferanten oder im Ausland können datenschutztechnische Probleme dadurch vielfach umgangen werden, allerdings setzt diese hybride Umsetzung eine ständige Datenverbindung zwischen Tabletcomputer und Unternehmensnetzwerk voraus. Für die nähere Zukunft soll das Augmented Reality-System zudem dahingehend weiterentwickelt werden, dass die Definition der Referenzpunkte für die Ausrichtung nicht mehr durch Angabe der x -, y - und z -Koordinaten durchgeführt wird, sondern sich die Marker und Adapter als virtuelle Objekte im virtuellen Untersuchungsmodell platzieren lassen. Dadurch sind die Koordinaten der Referenzpunkte inklusive der verwendeten Adapter und Marker direkt bekannt und müssen nicht mehr manuell eingegeben und zugeordnet werden. Dieser Ansatz verspricht großes Potenzial, die Vorbereitung der Ausrichtung des Augmented Reality-Systems deutlich einfacher und komfortabler zu machen.

Sehr großes Potenzial besteht allgemein in der Weiterentwicklung der Trackingsysteme. Je einfacher und schneller der Ausrichtungsprozess ist und je genauer das Tracking selbst arbeitet, desto mehr Anwendungsfälle können durch das System abgedeckt werden. In diesem Zusammenhang rückt der Einsatz von 3D-Scannern in den Fokus. Mithilfe von z. B. Musterprojektionsverfahren, Structure-From-Motion-Ansätzen, Laserscannern oder Time-Of-Flight-Kameras können physische Objekte als dreidimensionale Punktwolken rekonstruiert werden. Über diese Punktwolke lässt sich die Lage eines Objektes gegenüber dem 3D-Scanner abschätzen und somit ein Tracking realisieren. Die Tiefeninformationen lassen sich einerseits zur korrekten Darstellung von physischen Verde-

ckungsobjekten verwenden, ohne dass die korrespondierenden 3D-Modelle als Verdeckungsobjekte herangezogen werden müssen. Andererseits werden dadurch automatisierte Qualitätsanalysen bzw. Soll-Ist-Abgleiche möglich, da das rekonstruierte physische Objekt digital mit den virtuellen CAD-Daten abgeglichen werden kann. Die Beurteilung, ob eine Abweichung vorliegt, würde dann nicht mehr durch den Anwender anhand der visuellen Überdeckung von physischen und virtuellen Objekten, sondern durch das System selbst anhand des Vergleichs der Punktwolke des physischen Objektes mit dem zugehörigen CAD-Modell getroffen werden. Wurde ein Objekt rekonstruiert und digital abgeglichen, dient das Augmented Reality-System der intuitiven Visualisierung der erkannten Abweichungen z. B. in einer Falschfarbendarstellung. Anders als bei der rein virtuellen Betrachtung der Ergebnisse am Computer hat der Anwender einen direkten Bezug zwischen physischem Messobjekt und virtuellen Messdaten. Erste vielversprechende Ansätze existieren bereits [KBK⁺13], befinden sich aber noch in einer frühen Forschungsphase.

Für eine möglichst realistisch wirkende Verschmelzung der virtuellen Umfänge mit der Realität ist besonders die Weiterentwicklung von Optical-see-through-HMDs interessant. Durch sie hat der Anwender einen direkten Blick auf die physische Umgebung, die Darstellung der virtuellen Umgebung ist zudem stereoskopisch möglich. Heutige OST-HMDs liefern zwar noch nicht die für geometrische Analysen benötigte Genauigkeit, da die Position der Augen relativ zu den Displays genau bekannt sein muss. Allerdings existieren viele verschiedene Forschungsarbeiten, die dieser Problematik mit unterschiedlichen technischen und methodischen Ansätzen begegnen [IK15] [ACS⁺11]. Eine in diesem Zusammenhang besonders futuristisch wirkende Realisierungsmöglichkeit von OST-HMDs sind virtuelle Netzhautanzeigen (VNAs), welche das virtuelle Bild direkt auf die Netzhaut der Augen des Anwenders projizieren. VNAs haben den Vorteil, dass die Systeme deutlich kleiner gebaut werden können als herkömmliche Displays. Schon heute bieten derartige Anzeigeegeräte eine relativ hohe Auflösung und Farbtreue sowie ein großes Sichtfeld, sodass ein produktiver Einsatz in den nächsten Jahren realistisch erscheint [MGK17] [JBM⁺17].

A Fragebogen Vorwissen

Der in Abbildung A.1 dargestellte Fragebogen diente während der Evaluierung in Kapitel 6 der Ermittlung des Vorwissens der Probanden. Die Zahlen in den Kästchen der Antwortmöglichkeiten stehen für die Anzahl der Probanden, die die jeweilige Antwortmöglichkeit ausgewählt haben.

	stimme gar nicht zu			stimme voll zu	
1. Ich habe Erfahrung im Umgang mit Computern.			2	3	5
2. Ich habe Erfahrung im Umgang mit Smartphones.				4	6
3. Ich habe Erfahrung im Umgang mit Tabletcomputern.			1	5	4
4. Ich habe Erfahrung im Umgang mit CAD-Systemen.	2	2	3	3	
5. Ich habe Erfahrung in der Analyse von CAD-Daten.	3	3	3	1	
6. Ich habe Erfahrung im Umgang mit Koordinatenmesstechnik.	3	3	1	2	1
7. Ich habe Erfahrung im Umgang mit Augmented Reality-Systemen.	8	1	1		
8. Ich habe Erfahrung im Umgang mit dem System AURA.	10				
9. Ich bin neuen Technologien gegenüber aufgeschlossen.				5	5

Abbildung A.1: Fragebogen zum Vorwissen

B Fragebogen SUS-Punktzahl

Der in Abbildung B.1 dargestellte Fragebogen diente während der Evaluierung in Kapitel 6 der Ermittlung der System Usability Scale-Punktzahl nach dem in Abschnitt 2.3.4 vorgestellten Schema. Die Zahlen in den Kästchen der Antwortmöglichkeiten stehen für die Anzahl der Probanden, die die jeweilige Antwortmöglichkeit ausgewählt haben.

	stimme gar nicht zu			stimme voll zu	
1. Ich kann mir sehr gut vorstellen, das System regelmäßig zu nutzen.					10
2. Ich finde, dass das System unnötig kompliziert ist.	7	3			
3. Ich finde, dass das System ist einfach bedienbar ist.				3	7
4. Ich denke, dass ich Support benötigen würde, um das System nutzen zu können.	5	5			
5. Ich finde, dass die verschiedenen Funktionen des Systems gut integriert sind.				2	8
6. Ich finde, dass es im System zu viele Inkonsistenzen gibt.	9	1			
7. Ich kann mir vorstellen, dass die meisten Kollegen das System schnell beherrschen werden.				4	6
8. Ich finde, dass die Bedienung des Systems sehr umständlich ist.	8	2			
9. Ich habe mich bei der Nutzung des Systems sehr sicher gefühlt.			1	5	4
10. Ich musste einiges lernen, bevor ich mit dem System arbeiten konnte.	4	6			

Abbildung B.1: Fragebogen zur Ermittlung der SUS-Punktzahl

Abbildungsverzeichnis

1.1	Aufbau der Arbeit	4
2.1	Produktentstehungsprozess als Folge von Zyklen [Gau13]	12
2.2	Magisches Dreieck der Produktentstehung nach [Eng06]	14
2.3	Reality-Virtuality-Continuum, in Anlehnung an [MK94]	16
2.4	Optical-see-through-HMD, in Anlehnung an [Azu97]	17
2.5	Video-see-through-HMD, in Anlehnung an [Azu97]	18
2.6	Monitorbasiertes System, in Anlehnung an [Azu97]	19
2.7	Markertypen	20
2.8	Mechanische Trackingsysteme	21
2.9	Intrinsische und extrinsische Transformation	25
2.10	Augmented Reality zur Navigation und Orientierung	27
2.11	Augmented Reality in Unterhaltung und Marketing	28
2.12	Augmented Reality zur Unterstützung komplexer Arbeitsprozesse	29
2.13	Augemented Reality für geometrische Analysen	30
2.14	Komponenten der Gebrauchstauglichkeit [DIN99]	31
2.15	Menschzentrierter Gestaltungsprozess [DIN11]	34
2.16	Fragebogen zur Ermittlung der SUS-Punktzahl, in Anlehnung an [Bro96]	35
2.17	Interpretation der SUS-Punktzahl, in Anlehnung an [BKM08]	36
3.1	Umfeld- und Qualitätsanalyse [Kat12]	39
3.2	Umfeldanalyse Produkt	40
3.3	Umfeldanalyse Produktionssystem [Pen09]	41
3.4	Qualitätsanalyse Produkt und Produktionssystem	42
3.5	Beispiele für Darstellungsarten virtueller Objekte	45
3.6	AR-System mit Inside-out-Quadratmarkertracking [Bad12]	47
3.7	Prinzipskizze Inside-out-Quadramarkertracking	48
3.8	Markeradapter	49
3.9	AR-System mit Outside-in-Baummarkertracking [ART17]	50
3.10	Prinzipskizze Outside-in-Baummarkertracking	52
3.11	AR-System mit mechanischem Tracking [DAI18]	53

3.12	Prinzipskizze mechanisches Tracking	54
3.13	AR-System mit Lasertracker [SM10]	55
3.14	Prinzipskizze Lasertracking	56
3.15	Anwendungsfalldiagramm Augmented Reality-Untersuchung . .	58
3.16	Vorgehen nach dem menschenzentrierten Gestaltungsprozess . . .	60
4.1	Hierarchische Produktstruktur	64
4.2	Hierarchische Fabrikstruktur	66
4.3	Zusammenhang zwischen Genauigkeit und Arbeitsraum	71
5.1	Photogrammetrisches Messsystem [AIC17]	82
5.2	Konzeptmodell Markeradapter [Jer16]	84
5.3	Komponenten eines Tabletcomputers	88
5.4	Prinzipskizze Gesamtsystem	91
5.5	Gesamtprozess Augmented Reality-Untersuchung durchführen .	92
5.6	Aktivitätsdiagramm Kamera kalibrieren	93
5.7	Aktivitätsdiagramm CAD-Daten laden	94
5.8	Aktivitätsdiagramm Tracking konfigurieren	95
5.9	Aktivitätsdiagramm Tracking ausrichten	95
5.10	Aktivitätsdiagramm Tracking durchführen	96
5.11	Strukturierung des Gesamtprozesses	98
5.12	Anwendungsfalldiagramm mit Benutzergruppen	101
5.13	Früher Designentwurf zu AURA [Hub13]	102
5.14	Evolution der Benutzerführung	103
5.15	Dialog Projektverwaltung	108
5.16	Dialog Projektübersicht	109
5.17	Dialog CAD-Daten laden	110
5.18	Dialog Ausrichtung vorbereiten	112
5.19	Dialog Ausrichtung durchführen	113
5.20	Dialog Untersuchungsmodus	115
5.21	Dialog Strukturbaum und Translation	116
5.22	Dialog Bildquelle	117
5.23	Dialog Bearbeiten von Screenshots	119
5.24	Dialog Untersuchungsprotokoll	120
6.1	Untersuchungsobjekt Mechanisierungsrahmen	125
6.2	Präparierte Fehlerarten	126
6.3	Ausrichtungspunkte auf vorderer Subpalette	127
6.4	Ergebnisse des Fragebogens zum Vorwissen	132
6.5	Dauer der Vorbereitung je Proband und Prozessschritt	134

6.6	Dauer der Offline-Analyse je Proband und Prozessschritt	135
6.7	Dauer der Online-Analyse je Proband und Prozessschritt	135
6.8	Ergebnis SUS-Punktzahl, in Anlehnung an [BKM08]	137
A.1	Fragebogen zum Vorwissen	145
B.1	Fragebogen zur Ermittlung der SUS-Punktzahl	146

Tabellenverzeichnis

4.1	Einfluss der Anforderungen auf die Systemkomponenten	74
5.1	Vergleich der Trackingmethoden	78
5.2	Vergleich der Visualisierungsmethoden	85

Literaturverzeichnis

- [ACS⁺11] Magnus Axholt, Matthew D. Cooper, Martin A. Skoglund, Stephen R. Ellis, Stephen D. O’Connell und Anders Ynnerman. „Parameter estimation variance of the single point active alignment method in optical see-through head mounted display calibration“. In: *2011 IEEE Virtual Reality Conference*. März 2011, S. 27–34. DOI: 10.1109/VR.2011.5759432.
- [AIC17] AICON 3D Systems GmbH. URL: <http://www.aicon3d.com/de-DE/products/moveinspect-technology/aicon-moveinspect-dpa> (besucht am 20.06.2017).
- [AJS18] AngularJS super-powered by Google. URL: <https://angularjs.org/> (besucht am 20.03.2018).
- [AO09] Samuel Audet und Masatoshi Okutomi. „A user-friendly method to geometrically calibrate projector-camera systems“. In: *2009 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*. Juni 2009, S. 47–54. DOI: 10.1109/CVPRW.2009.5204319.
- [ART17] Advanced Realtime Tracking. URL: <https://ar-tracking.com/automotive-industry/audi-germany/> (besucht am 30.08.2017).
- [ART18] Advanced Realtime Tracking. URL: <https://ar-tracking.com/products/markers-targets/targets/> (besucht am 19.01.2018).
- [Azu97] Ronald T. Azuma. „A survey of augmented reality“. In: *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*. Bd. 6. 4. Aug. 1997, S. 355–385.
- [Bad12] Christian Bade. „Untersuchungen zum Einsatz der Augmented Reality Technologie für Soll/Ist-Vergleiche von Betriebsmitteln in der Fertigungsplanung“. Dissertation. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2012.

- [BCL15] Mark Billinghurst, Adrian Clark und Gun Lee. „A Survey of Augmented Reality“. In: *Found. Trends Hum.-Comput. Interact.* Bd. 8. 2-3. Hanover, MA, USA: Now Publishers Inc., März 2015, S. 73–272. DOI: 10.1561/11000000049.
- [Ben15] Alessandro Benoit. *NW.js Essentials*. Birmingham: Packt Publishing, 2015.
- [Ber08] Ulrich Bergmaier. „Augmented Reality in Vehicles – Technical Realisation of a Contact Analogue Head-Up Display under Automotive Capable Aspects; Usefulness Exemplified through Night Vision Systems.“ In: *32nd World Automotive Congress (FISITA)*. 2008.
- [BGK13] Björn Bliese, Oliver Geißel und Jan-Phillip Kobler. „Kalibrierung und resultierende Genauigkeit eines Mixed Reality-Systems mit mechanischem Tracking“. In: *12. Paderborner Workshop Augmented und Virtual Reality in der Produktentstehung*. 2013.
- [BGW10] Uwe Bracht, Dieter Geckler und Sigrid Wenzel. *Digitale Fabrik - Methoden und Praxisbeispiele*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2010.
- [BKM08] Aaron Bangor, Philip T. Kortum und James T. Miller. „An Empirical Evaluation of the System Usability Scale“. In: *International Journal of Human-Computer Interaction*. Bd. 24. 6. 2008, S. 574–594. DOI: 10.1080/10447310802205776.
- [BMK09] Aaron Bangor, James Miller und Philip Kortum. „Determining What Individual SUS Scores Mean: Adding an Adjective Rating Scale“. In: *Journal of Usability Studies*. Bd. 4. 3. 2009, S. 114–123.
- [BMP+15] Johannes Behr, Christophe Mouton, Samuel Parfouru, Julien Champeau, Clotilde Jeulin, Maik Thöner, Christian Stein, Michael Schmitt, Max Limper, Miguel de Sousa, Tobias Alexander Franke und Gerrit Voss. „webVis/Instant3DHub: Visual Computing As a Service Infrastructure to Deliver Adaptive, Secure and Scalable User Centric Data Visualisation“. In: *Proceedings of the 20th International Conference on 3D Web Technology*. Web3D ’15. Heraklion, Crete, Greece: ACM, 2015, S. 39–47. ISBN: 978-1-4503-3647-5. DOI: 10.1145/2775292.2775299.
- [Bro66] Duance C. Brown. „Decentering Distortion of Lenses. Paper presented to the Annual Convention of the American Society of Photogrammetry.“ In: *Photometric Engineering Bd. 32*. 1966.

- [Bro96] John Brooke. „SUS - A quick and dirty usability scale“. In: *Usability evaluation in industry*. ISBN: 9780748404605. Boca Raton: CRC Press, Juni 1996.
- [BST11] Markus Broecker, Ross T. Smith und Bruce H. Thomas. „Adaptive substrate for enhanced spatial augmented reality contrast and resolution“. In: *2011 10th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality*. Okt. 2011, S. 251–252. DOI: 10.1109/ISMAR.2011.6092401.
- [BWH⁺07] Christoph Bichlmeier, Felix Wimmer, Sandro Michael Heining und Nassir Navab. „Contextual Anatomic Mimesis Hybrid In-Situ Visualization Method for Improving Multi-Sensory Depth Perception in Medical Augmented Reality“. In: *2007 6th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*. Nov. 2007, S. 129–138. DOI: 10.1109/ISMAR.2007.4538837.
- [CMP⁺06] Andrew I. Comport, Eric Marchand, Muriel Pressigout und François Chaumette. „Real-time markerless tracking for augmented reality: the virtual visual servoing framework“. In: *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*. Bd. 12. 4. Juli 2006, S. 615–628. DOI: 10.1109/TVCG.2006.78.
- [CSD93] Carolina Cruz-Neira, Daniel J. Sandin und Thomas A. DeFanti. „Surround-screen Projection-based Virtual Reality: The Design and Implementation of the CAVE“. In: *Proceedings of the 20th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. SIGGRAPH '93. Anaheim, CA: ACM, 1993, S. 135–142. ISBN: 0-89791-601-8. DOI: 10.1145/166117.166134.
- [Cug97] J. F. Cugy. *Digital Mock-up (DMU) For Product Conception And Downstream Processes (DMU-BP) n0 BE-96-3130. Technical Annex for a Brite-Euram III project*. Zugriff eingeschränkt auf Konsortiumsmitglieder. The AIT Consortium, 1997.
- [DAI18] Daimler AG. URL: https://mercedes-benz-blog.blogspot.de/2012/08/the-new-mercedes-benz-gl-class_28.html (besucht am 09.02.2018).
- [DDS⁺09] Thomas A. DeFanti, Gregory Dawe, Daniel J. Sandin, Jurgen P. Schulze, Peter Otto, Javier Girado, Falko Kuester, Larry Smarr und Ramesh Rao. „The StarCAVE, a Third-generation CAVE and Virtual Reality OptIPortal“. In: *Future Gener. Comput. Syst.* Bd. 25. 2. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Science Publis-

- hersch B. V., Feb. 2009, S. 169–178. DOI: 10.1016/j.future.2008.07.015.
- [DIN08] Deutsches Institut für Normung e.V. *DIN EN ISO 9241-110:2008-09: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 110: Grundsätze der Dialoggestaltung (ISO 9241-110:2006)*. Beuth Verlag, Berlin, 2008.
- [DIN11] Deutsches Institut für Normung e.V. *DIN EN ISO 9241-210:2011-01: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 210: Prozess zur Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme (ISO 9241-210:2010)*. Beuth Verlag, Berlin, 2011.
- [DIN99] Deutsches Institut für Normung e.V. *DIN EN ISO 9241-11:1999-01: Ergonomische Anforderungen für Bürotätigkeiten mit Bildschirmgeräten - Teil 11: Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit; Leitsätze (ISO 9241-11:1998)*. Beuth Verlag, Berlin, 1999.
- [DM96] David Drascic und Paul Milgram. „Perceptual Issues in Augmented Reality“. In: *SPIE Volume 2653: Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems III*. 1996, S. 123–134.
- [DR99] Joseph S. Dumas und Janice Redish. *A Practical Guide to Usability Testing*. Human/computer interaction. Portland, Oregon: Intellect Books, 1999. ISBN: 9781841500201.
- [EHA03] Bernhard Ebel, Markus B. Hofer und Jumana Al-Sibai, Hrsg. *Automotive Management: Strategie und Marketing in der Automobilwirtschaft*. Berlin, Heidelberg: Gabler Verlag / Springer Fachmedien, 2003. ISBN: 9783540002260.
- [Eng06] Werner Engeln. *Methoden der Produktentwicklung*. Skripten Automatisierungstechnik. München: Oldenbourg Industrieverlag, 2006. ISBN: 9783835631120.
- [ES09] Martin Eigner und Ralph Stelzer. *Product Lifecycle Management: Ein Leitfaden für Product Development und Life Cycle Management*. 2. Aufl. VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. ISBN: 978-3-540-44373-5. DOI: 10.1007/b93672.
- [FAR17] FARO Europe GmbH & Co. KG. URL: https://knowledge.faro.com/Hardware/FaroArm_and_ScanArm/USB_FaroArm/Technical_Specification_Sheet_for_the_Quantum (besucht am 10. 11. 2017).

- [FAR18] FARO Europe GmbH & Co. KG. URL: <https://www.faro.com/de-de/produkte/industrielle-messtechnik/faro-laser-tracker/> (besucht am 03.02.2018).
- [FC22] Henry Ford und Samuel Crowther. *My Life and Work*. New York: Doubleday, Page, 1922.
- [Fia05] Mark Fiala. „ARTag, a fiducial marker system using digital techniques“. In: *2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05)*. Bd. 2. Juni 2005, 590–596 vol. 2. DOI: 10.1109/CVPR.2005.74.
- [Gau12] Jürgen Gausemeier. *Virtuelle Synchronisation von Produktentwicklung und Produktionssystementwicklung*. München: Carl Hanser Verlag, 2012. ISBN: 9783446429857.
- [Gau13] Jürgen Gausemeier. *Strategische Planung und integrative Entwicklung der technischen Systeme von morgen. Schriftenreihe der Nordrhein-Westfälische Akademie der Wissenschaften*. Paderborn: Verlag Ferdinand Schöningh, 2013.
- [Gei12] Oliver Geißel. „AMMU Automotive Mixed Mock-Up: Konzeption einer neuen Entwicklungsplattform für die Automobilindustrie“. Dissertation. Universität Stuttgart, 2012.
- [Ger02] Thomas Gerboth. „Das Magische Dreieck“. In: *Controlling*. Hrsg. Peter Horvath und Thomas Reichmann. Bd. 14. 7. 2002, S. 417–418. ISBN: 0935-0381. DOI: 10.15358/0935-0381-2002-7-417.
- [GMM⁺14] S. Garrido-Jurado, R. Muñoz-Salinas, F. J. Madrid-Cuevas und M. J. Marín-Jiménez. „Automatic Generation and Detection of Highly Reliable Fiducial Markers Under Occlusion“. In: *Pattern Recogn.* Bd. 47. 6. New York, NY, USA: Elsevier Science Inc., Juni 2014, S. 2280–2292. DOI: 10.1016/j.patcog.2014.01.005.
- [God93] Robert Godding. „Ein photogrammetrisches Verfahren zur Überprüfung und Kalibrierung digitaler Bildaufnahmesysteme“. In: *Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung Bd. 2*. 1993.
- [GSB⁺07] Pierre Georgel, Pierre Schroeder, Selim Benhimane, Stefan Hinterstoisser, Mirko Appel und Nassir Navab. „An Industrial Augmented Reality Solution For Discrepancy Check“. In: *Proceedings of the 2007 6th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*. ISMAR '07. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2007, S. 1–4. ISBN: 978-1-4244-1749-0. DOI: 10.1109/ISMAR.2007.4538834.

- [Gül11] Reinhard Güll. „Zum Geburtstag des Automobils“. In: *Statistisches Monatsheft Baden-Württemberg 6/2011*. 2011.
- [Häc14] Carina Häcker. „Nutzergerechte Gestaltung mobiler AR-Anwendungen im industriellen Umfeld“. Masterarbeit. Hochschule Pforzheim, 2014.
- [HB08] Mathias Hüttenrauch und Markus Baum. *Effiziente Vielfalt. Die dritte Revolution in der Automobilindustrie*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008.
- [Hei10] Viktoria Heindorf. *Der Einsatz moderner Informationstechnologien in der Automobilproduktentwicklung - Produktivitätspotenziale und Systemkomplementaritäten*. Wiesbaden: Gabler Verlag / Springer Fachmedien, 2010.
- [Her06] Andreas Herglotz. „Lokalisierung und Orientierung in Gebäuden - IMAPS und Headmounted Display im Einsatz als Museumsführer“. Bachelorarbeit. Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, 2006.
- [HK18] Hahn+Kolb Werkzeuge. URL: <https://www.hahn-kolb.de/ALUFIX-3-Backen-Spannfutter-82080-80-mm-Durchmesser/26575004.sku/de/DE/EUR/> (besucht am 22.02.2018).
- [Hub13] Caroline Huber. „Designvorschlag AURA - Augmented Reality-Apps“. Interne Präsentation Daimler AG. Sindelfingen, Nov. 2013.
- [IK14] Yuta Itoh und Gudrun Klinker. „Interaction-free calibration for optical see-through head-mounted displays based on 3D Eye localization“. In: *2014 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)*. März 2014, S. 75–82. DOI: 10.1109/3DUI.2014.6798846.
- [IK15] Yuta Itoh und Gudrun Klinker. „Light-Field Correction for Spatial Calibration of Optical See-Through Head-Mounted Displays“. In: *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*. Bd. 21. 4. Apr. 2015, S. 471–480. DOI: 10.1109/TVCG.2015.2391859.
- [IKE17] Condé Nast. Wired. URL: <https://www.wired.com/2013/08/a-new-ikea-app-lets-you-place-3d-furniture-in-your-home/> (besucht am 20.09.2017).

- [JBM⁺17] Changwon Jang, Kiseung Bang, Seokil Moon, Jonghyun Kim, Seungjae Lee und Byoungho Lee. „Retinal 3D: Augmented Reality Near-eye Display via Pupil-tracked Light Field Projection on Retina“. In: *ACM Trans. Graph.* Bd. 36. 6. New York, NY, USA: ACM, Nov. 2017, 190:1–190:13. DOI: 10.1145/3130800.3130889.
- [Jer16] Roman Jeroma. „Usability Analysis and Improvement of a Mobile Augmented Reality System for Industrial Applications“. Bachelorarbeit. Saxion University of Applied Sciences, 2016.
- [Kat12] Alfred Katzenbach. „Mixed Reality in der Fahrzeugentwicklung“. In: *5. Grazer Symposium Virtuelles Fahrzeug*. 2012.
- [KB99] Hirokazu Kato und Mark Billinghurst. „Marker tracking and HMD calibration for a video-based augmented reality conferencing system“. In: *2nd IEEE and ACM International Workshop on Augmented Reality, 1999. (IWAR '99)*. 1999, S. 85–94. DOI: 10.1109/IWAR.1999.803809.
- [KBK⁺13] Svenja Kahn, Ulrich Bockholt, Arjan Kuijper und Dieter W. Feller. „Towards Precise Real-time 3D Difference Detection for Industrial Applications“. In: *Comput. Ind.* Bd. 64. 9. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Science Publishers B. V., Dez. 2013, S. 1115–1128. DOI: 10.1016/j.compind.2013.04.004.
- [Kle07] Christian Kleinschmidt. *Technik und Wirtschaft im 19. und 20. Jahrhundert*. Enzyklopädie deutscher Geschichte. München: R. Oldenbourg Verlag, 2007. ISBN: 9783486580303.
- [Kle08] Leslie Klein. „Realisation and Evaluation of Conformal Navigational Arrows in a Conformal Head-Up Display“. Bachelorarbeit. Lehrstuhl für Informatikanwendungen in der Medizin & Augmented Reality, Technische Universität München, 2008.
- [KM07] Georg Klein und David Murray. „Parallel Tracking and Mapping for Small AR Workspaces“. In: *2007 6th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*. Nov. 2007, S. 225–234. DOI: 10.1109/ISMAR.2007.4538852.
- [KMO⁺09] Stefan Kiener, Nicolas Maier-Scheubeck, Robert Obermaier und Manfred Weiß. *Produktions-Management: Grundlagen der Produktionsplanung und -steuerung*. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2009.
- [KW04] Heinrich Keßler und Georg Winkelhofer. *Projektmanagement - Leitfaden zur Steuerung und Führung von Projekten*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2004.

- [Kyl99] Stephen Kyle. „Operational features of the Leica laser tracker“. In: *Conference: IEE Seminar on Business Improvement Through Measurement*. Juni 1999. DOI: 10.1049/ic:19990758.
- [Luh10] Thomas Luhmann. *Nahbereichsphotogrammetrie: Grundlagen, Methoden und Anwendungen*. Berlin: Herbert Wichmann-Verlag, 2010. ISBN: 9783879073214.
- [MGK17] Andrew Maimone, Andreas Georgiou und Joel S. Kollin. „Holographic Near-eye Displays for Virtual and Augmented Reality“. In: *ACM Trans. Graph.* Bd. 36. 4. New York, NY, USA: ACM, Juli 2017, 85:1–85:16. DOI: 10.1145/3072959.3073624.
- [MIC18] Microsoft Corporation. URL: <https://msdn.microsoft.com/de-de/library/windows/apps/hh465415.aspx> (besucht am 21.02.2018).
- [MK94] Paul Milgram und Fumio Kishino. „A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays“. In: *IEICE Transactions on Information Systems*. Bd. E77-D. 12. Dez. 1994.
- [ML13] Kouichi Matsuda und Rodger Lea. *WebGL Programming Guide: Interactive 3D Graphics Programming with WebGL*. OpenGL. Ann Arbor, Michigan: Pearson Education, 2013. ISBN: 9780133364927.
- [NCH⁺10] Stéphane Nicolau, J. T. Chen, Yolin Ho, Hsiang Wu, Michael Huang und Luc Soler. *Evaluation of marker tracking accuracy using a single camera with respect to the number of marker points*. Juni 2010.
- [Nic13] Wolfram Nickel. *100 Jahre Fließbandfertigung: Autos am laufenden Band*. 2013. URL: <http://www.zeit.de/auto/2013-04/ford-fließband-massenproduktion> (besucht am 21.02.2018).
- [NK06] Stefan Nolle und Gudrun Klinker. „Augmented reality as a comparison tool in automotive industry“. In: *2006 IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*. Okt. 2006, S. 249–250. DOI: 10.1109/ISMAR.2006.297829.
- [Nöl06] Stefan Nölle. „Augmented Reality als Vergleichswerkzeug am Beispiel der Automobilindustrie“. Dissertation. Technische Universität München, 2006.
- [NW18] NW.js. URL: <https://nwjs.io/> (besucht am 20.03.2018).
- [Pen09] Katharina Pentenrieder. „Augmented Reality based Factory Planning“. Dissertation. Technische Universität München, 2009.

- [PMK06] Katharina Pentenrieder, Peter Meier und Gudrun Klinker. „Analysis of Tracking Accuracy for Single-Camera Square-Marker-Based Tracking“. In: *Proc. Dritter Workshop Virtuelle und Erweiterte Realität der GI-Fachgruppe VR/AR*. Koblenz, Germany, Sep. 2006.
- [PT02] Wayne Piekarski und Bruce Thomas. „ARQuake: The Outdoor Augmented Reality Gaming System“. In: *Commun. ACM*. Bd. 45. 1. New York, NY, USA: ACM, Jan. 2002, S. 36–38. DOI: 10.1145/502269.502291.
- [Rad14] Martin H. Rademacher. *Virtual Reality in der Produktentwicklung: Instrumentarium zur Bewertung der Einsatzmöglichkeiten am Beispiel der Automobilindustrie*. Schriften zur Medienproduktion. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014. ISBN: 9783658070137.
- [RCS11] Jeffrey Rubin, Dana Chisnell und Jared Spool. *Handbook of Usability Testing: How to Plan, Design, and Conduct Effective Tests*. Indianapolis: Wiley Publishing, 2011. ISBN: 9781118080405.
- [Rei10] Alexander W. Reichhuber. *Strategie und Struktur in der Automobilindustrie: Strategische und organisatorische Programme zur Handhabung automobilwirtschaftlicher Herausforderungen*. Hrsg. Max J. Ringlstetter. Gabler Research: Schriften zur Unternehmensentwicklung. Wiesbaden: Gabler Verlag, 2010. ISBN: 9783834922182.
- [RF13] Michael Richter und Markus D. Flückiger. *Usability Engineering kompakt: Benutzbare Software gezielt entwickeln*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2013. ISBN: 9783827418371.
- [Sch05] Oliver Schreer. *Stereoanalyse und Bildsynthese*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2005. ISBN: 9783540234395.
- [Sch08] Thomas Schilling. „Augmented Reality in der Produktenstehung“. Dissertation. Technische Universität Ilmenau, 2008.
- [Sch09] Stephan Scholtissek. *Die Magie der Innovation: Erfolgsgeschichten von Audi bis Zara*. München: mi-Wirtschaftsbuch, FinanzBuch Verlag, 2009. ISBN: 9783868800142.
- [SDW⁺14] Darko Stanimirovic, Nina Damasky, Sabine Webel, Dirk Koriath, Andrea Spillner und Daniel Kurz. „[Poster] A Mobile Augmented reality system to assist auto mechanics“. In: *2014 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*. Sep. 2014, S. 305–306. DOI: 10.1109/ISMAR.2014.6948462.
- [Sei09] Reinhard Seiffert. *Die Ära Gottlieb Daimlers*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2009.

- [SHI⁺11] R. Stark, H. Hayka, J.H. Israel, M. Kim, P. Müller und U. Völlinger. „Virtuelle Produktentstehung in der Automobilindustrie“. In: *Informatik-Spektrum*. Bd. 34. 1. Feb. 2011, S. 20–28. DOI: 10.1007/s00287-010-0501-z.
- [SK97] Günter Spur und Frank-Lothar Krause. *Das virtuelle Produkt: Management der CAD-Technik*. München, Wien: Hanser Verlag, 1997. ISBN: 9783446191761.
- [SLT⁺15] Christian Stein, Max Limper, Maik Thoener und Johannes Behr. „hare3d - Rendering Large Models in the Browser“. In: *WebGL Insights*. Hrsg. Patrick Cozzi. <http://www.webglinsights.com/>. CRC Press, Juli 2015. Kap. 20, S. 317–332. ISBN: 978-1498716079.
- [SM10] Fabian Scheer und Stefan Müller. „Large area indoor tracking for industrial augmented reality“. In: *2010 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality*. Okt. 2010, S. 269–270. DOI: 10.1109/ISMAR.2010.5643601.
- [SM12] Fabian Scheer und Stefan Müller. „Indoor Tracking for Large Area Industrial Mixed Reality“. In: *Joint Virtual Reality Conference of ICAT - EGVE - EuroVR*. Hrsg. Ronan Boulic, Carolina Cruz-Neira, Kiyoshi Kiyokawa und David Roberts. The Eurographics Association, 2012. ISBN: 978-3-905674-40-8. DOI: 10.2312/EGVE/JVRC12/021-028.
- [Sut68] Ivan E. Sutherland. „A Head-mounted Three Dimensional Display“. In: *Proceedings of the December 9-11, 1968, Fall Joint Computer Conference, Part I*. AFIPS '68 (Fall, part I). San Francisco, California: ACM, 1968, S. 757–764. DOI: 10.1145/1476589.1476686.
- [TCD⁺02] Bruce Thomas, Ben Close, John Donoghue, John Squires, Phillip De Bondi und Wayne Piekarski. „First Person Indoor/Outdoor Augmented Reality Application: ARQuake“. In: *Personal and Ubiquitous Computing*. Bd. 6. 1. Feb. 2002, S. 75–86. DOI: 10.1007/s007790200007.
- [TKK08] Marcus Tönnis, Leslie Klein und Gudrun Klinker. „Perception thresholds for augmented reality navigation schemes in large distances“. In: *7th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, ISMAR 2008, Cambridge, UK, 15-18th September 2008*. 2008, S. 189–190. DOI: 10.1109/ISMAR.2008.4637360.

- [Tön10] Marcus Tönnis. *Augmented Reality: Einblicke in die Erweiterte Realität*. Informatik im Fokus. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. ISBN: 978-3-642-14178-2. DOI: 10.1007/978-3-642-14179-9.
- [Tüm09] Johannes Tümmler. „Untersuchungen zu nutzerbezogenen und technischen Aspekten beim Langzeiteinsatz mobiler Augmented Reality Systeme in industriellen Anwendungen“. Dissertation. Otto-von-Guericke-Uni Magdeburg, 2009.
- [VBH⁺09] Sándor Vajna, Helmut Bley, Peter Hehenberger, Christian Weber und Klaus Zeman. *CAX für Ingenieure Eine praxisbezogene Einführung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009. ISBN: 9783540360391 3540360395.
- [VDA12] Verband der Automobilindustrie e.V. *Die digitale Revolution im Automobil*. VDA-Magazin: Vernetzung. Berlin, Aug. 2012.
- [VDI04] Verein Deutscher Ingenieure. *VDI 2206: Entwicklungsmethodik mechatronischer Produkte*. Beuth Verlag. Berlin, Juni 2004.
- [VDI08] Verein Deutscher Ingenieure. *VDI 4499 Blatt 1 2008: Digitale Fabrik Grundlagen*. Beuth Verlag. Berlin, Feb. 2008.
- [VDI09] Verein Deutscher Ingenieure. *VDI 5200: Fabrikplanung Planungsverfahren*. Beuth Verlag. Berlin, Jan. 2009.
- [VDI93] Verein Deutscher Ingenieure. *VDI 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Produkte*. Beuth Verlag. Berlin, Mai 1993.
- [VW08] Nicole F. Velasquez und Suzanne P. Weisband. „Work Practices of System Administrators: Implications for Tool Design“. In: *Proceedings of the 2nd ACM Symposium on Computer Human Interaction for Management of Information Technology*. CHI/MIT '08. San Diego, California: ACM, 2008, 1:1–1:10. ISBN: 978-1-60558-355-6. DOI: 10.1145/1477973.1477975.
- [WBE⁺13] Sabine Webel, Uli Bockholt, Timo Engelke, Nirit Gavish, Manuel Olbrich und Carsten Preusche. „An Augmented Reality Training Platform for Assembly and Maintenance Skills“. In: *Robot. Auton. Syst.* Bd. 61. 4. Amsterdam, The Netherlands, The Netherlands: North-Holland Publishing Co., Apr. 2013, S. 398–403. DOI: 10.1016/j.robot.2012.09.013.

- [WFO09] Henning Wallentowitz, Arndt Freialdenhoven und Ingo Olschewski. *Strategien in der Automobilindustrie - Technologietrends und Marktentwicklungen*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2009.
- [WLS08] Daniel Wagner, Tobias Langlotz und Dieter Schmalstieg. „Robust and unobtrusive marker tracking on mobile phones“. In: *2008 7th IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*. Sep. 2008, S. 121–124. DOI: 10.1109/ISMAR.2008.4637337.
- [WS07] Daniel Wagner und Dieter Schmalstieg. „ARToolKitPlus for Pose Tracking on Mobile Devices“. In: *Computer Vision Winter Workshop 2007*. Hrsg. Michael Grabner und Helmut Grabner. St. Lambrecht, Austria, 6. Feb. 2007.
- [WWS07] Harald Wuest, Folker Wientapper und Didier Stricker. „Adaptable Model-Based Tracking Using Analysis-by-Synthesis Techniques“. In: *Computer Analysis of Images and Patterns. 12th International Conference, CAIP 2007, Vienna, Austria, August 27-29, 2007. Proceedings*. Hrsg. Kropatsch W. G., Kampel M. und Hanbury A. Bd. 4673. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2007, S. 20–27.
- [Zha99] Zhengyou Zhang. „Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations“. In: *Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision*. Bd. 1. 1999, S. 666–673. DOI: 10.1109/ICCV.1999.791289.
- [Zim01] Peter Zimmermann. *Virtual Reality - Forschung und Anwendung bei Volkswagen*. TU Braunschweig, Jan. 2001.

